

**Hydrogeologische und hydrologische
Untersuchungen in der Pupplinger Au
im Isartal südlich von München**

Steffen Müller

1973

Hydrogeologische und hydrologische
Untersuchungen in der Pupplinger Au
im Isartal südlich von München

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Geowissenschaftlichen Fakultät
der
Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt von
Steffen Müller
aus München

1973



1. Berichterstatter: Professor Dr. W.-D. Grimm
2. Berichterstatter: Professor Dr.-Ing. A. Maucher

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Mai 1973

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für allgemeine und angewandte Geologie und Mineralogie der Universität München im Rahmen eines Untersuchungsprogrammes über die Beziehungen zwischen Grund- und Flußwasser am Beispiel oberbayerischer Gewässer. Unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr. W.-D. Grimm arbeiteten gleichzeitig die Herren Dipl.-Geol. H. Dauschek und Dipl.-Geol. H. Weinig an ähnlichen Themen. Für die Anregung und wissenschaftliche Betreuung gilt daher mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr. W.-D. Grimm.

Die Arbeit ist die Zusammenfassung und Weiterführung zweier durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Internationalen Hydrologischen Dekade geförderter Forschungsvorhaben, die von den Herren Baudirektor J. Hofbauer, Präsident F. Bauer und Baudirektor Dr.-Ing. K. Scheurmann geleitet wurden. Diesen Herren sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft gebührt an dieser Stelle mein Dank für ihre großzügige Unterstützung.

Das benötigte Datenmaterial wurde von den Wasserwerken der Stadt München und von der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde zur Verfügung gestellt. Die Firma Preußag gestattete die Auswertung von Profilaufnahmen seismischer Schußpunktbohrungen. Allen Stellen sei herzlich gedankt.

Herrn Dr. H. Jerz vom Bayerischen Geologischen Landesamt und Herrn Dipl.-Geol. K. Cramer von der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde danke ich für ihre Beratung bei der Bearbeitung des geologischen Rahmens, Herrn Prof. Dr. V. Mammitzsch vom Mathematischen Institut der Universität München für die Durchsicht des mathematischen Teiles. Die Bayerische Akademie der Wissenschaften gestattete in dankenswerter Weise die Benutzung der Rechenanlagen im Leibniz-Rechenzentrum.

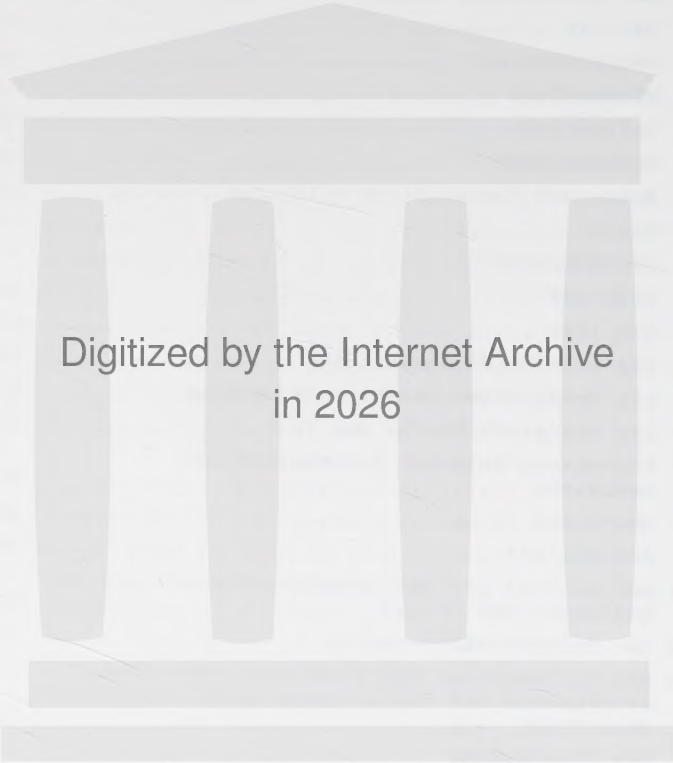
Schließlich möchte ich auch allen anderen danken, die am Fortgang der Arbeit teilgenommen haben.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

Vorwort

1.	Einleitung	1
2.	Der geologische Rahmen	5
2.1	Tertiär	7
2.2	Deckenschotter	8
2.3	Würmmoränen	10
2.3.1	Wallmoränen	10
2.3.2	Grundmoränen	10
2.4	Spät- und Postglaziale Bildungen	13
2.4.1	Seeton	13
2.4.2	Isarschotter	17
2.4.3	Kalktuff	20
3.	Die Isar	22
3.1	Die Entwicklungsgeschichte	22
3.2	Die derzeitigen Gestaltungsvorgänge	23
3.3	Die Feststoff-Fracht der Isar	35
3.3.1	Abgrenzung zwischen Schwebstoff und Geschiebe	35
3.3.2	Geschiebe	38
3.3.3	Schwebstoff	39
3.3.3.1	Der Einfluß auf den Schwebstoffgehalt und die Beziehung zum Abfluß	41
3.3.3.2	Der Schwebstofftransport	46
3.3.3.3	Die Schwankungen der Ganglinien von Schweb- stoffgehalt und Abfluß sowie deren Beziehungen zueinander	59
4.	Das Grundwasser	72
4.1	Die Grundwasserneubildung	72
4.2	Die Grundwasserstands-Schwankungen	86
Zusammenfassung		106
Literaturverzeichnis		108



Digitized by the Internet Archive
in 2026

1. E I N L E I T U N G

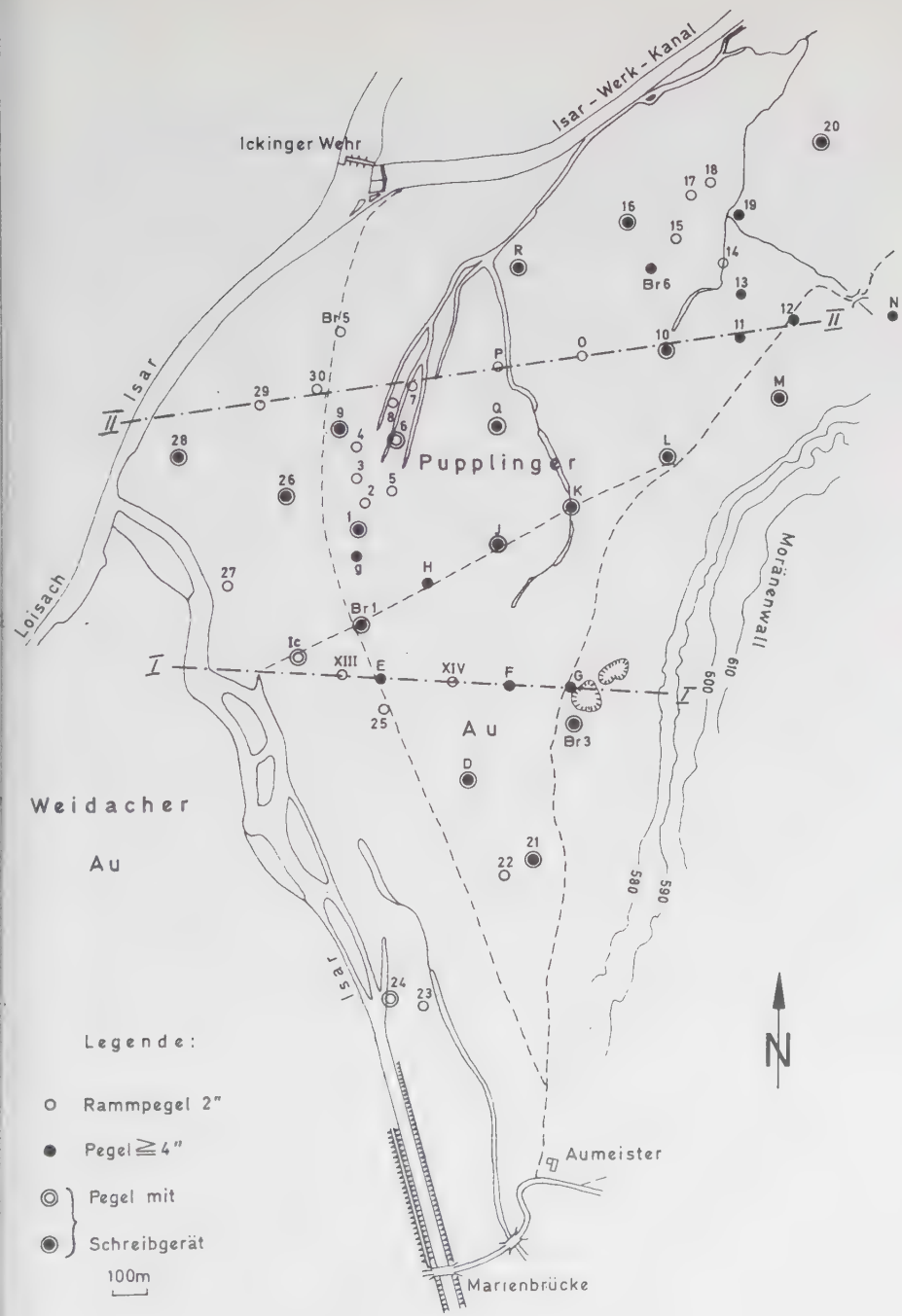
Die Pupplinger Au im Isartal bei Wolfratshausen erstreckt sich von Ascholding im Süden bis zur Aumühle etwa auf der Höhe der Ortschaft Hornstein im Norden. Im Osten bilden die Hänge des Isartales und im Westen der Fluß selbst die Begrenzungen des schmalen Geländestreifens. Im Norden wird der Fluß bei km 174 durch das Ickinger Wehr gestaut; hier zweigt nach rechts der Isarwerkkanal ab. Wenige Kilometer oberhalb mündet von links her die Loisach ein. Das Gebiet zwischen Isar und Loisach im Mündungsbereich heißt Weidacher Au. Die Gesamtbreite des Isartals beträgt im Süden des Arbeitsgebietes mehr als drei Kilometer und verengt sich nach Norden auf etwa einen Kilometer. Der Talboden ist eben, die Talhänge steigen steil bis zu 70 m auf.

Zwischen der Marienbrücke westlich der Ortschaft Puppling und der Loisachmündung haben die Uferregionen der Isar zum Teil noch den Charakter einer Wildflußlandschaft bewahrt. Wegen dieses urtümlichen Reizes sowie auf Grund ihres Reichtums an seltenen Pflanzen wurden die ufernahen Zonen sowohl der Pupplinger Au als auch der Weidacher Au zum Naturschutzgebiet erklärt. Das Gebiet ist heute ein beliebtes Ausflugsgebiet der Münchner Bevölkerung.

Für die Wahl der Pupplinger Au als Arbeitsgebiet waren verschiedene Gründe maßgebend. Im Vordergrund des Interesses stand dabei zum einen die quartäre Entwicklungsgeschichte dieses - zusammen mit dem Eglinger Zungenbecken - nördlichsten Ausläufers der Wolfratshausener Beckens, zum anderen die gegenwärtig dort wirksamen Gestaltungsvorgänge, die ihre Ursache weitgehend in den wasserwirtschaftlichen Ausbaumaßnahmen am Oberlauf der Isar haben. Diese künstlichen Eingriffe werden besonders in ihrem Einfluß auf den Feststoffhaushalt der Isar näher untersucht. Hinzu kommen als weiterer Grund die ausgezeichneten Aufschlußverhältnisse in der obersten grundwasserführenden Schicht in diesem Gebiet. Die Wasserwerke

München hatten lange Zeit beabsichtigt, die Pupplinger Au zur Trinkwasserversorgung heranzuziehen. Daher wurden dort zahlreiche Bohrungen niedergebracht, mehrere Pumpversuche unternommen und ein langjähriges Beobachtungsmaterial angesammelt, das in letzter Zeit außerdem noch durch Schreiblegelaufzeichnungen ergänzt wurde. Die Pupplinger Au nördlich der Marienbrücke wurde damit zu einem idealen Testfeld für die Beziehungen zwischen Grund- und Flußwasser. Bei allen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Betrachtungen stand die Suche nach geeigneten Methoden zur quantitativen Darstellung der Phänomene im Vordergrund. Dabei wurden teils mathematisch-statistische Verfahren, teils physikalische Modelle auf ihre Anwendbarkeit geprüft und, soweit sie zu befriedigenden Resultaten führten, in die vorliegende schriftliche Fassung aufgenommen.

Die Grundlage für den hydrologischen Teil der Arbeit bildete das Datenmaterial der im folgenden beschriebenen hydrologischen Meßstationen. In dem Gebiet befindet sich bei Puppling seit 1937 eine K l i m a s t a t i o n, die inzwischen mit einem Schreibgerät ausgerüstet wurde. Das Klima der Pupplinger Au entspricht dem des Alpenvorlandes. Kleine Verschiebungen entstehen jedoch durch die geschützte Tallage, die eine etwas geringere Niederschlagshöhe als auf den angrenzenden Hochflächen bewirkt. So ergibt sich für die Meßstelle Puppling, die auf etwa 590 m ü. NN liegt, im langjährigen Mittel ein Wert von 1119 mm, für Thanning dagegen - 6,5 km östlich von Puppling auf 640 m ü. NN gelegen - ein Wert von 1237 mm. Der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Isarabfluß im Bereich der Pupplinger Au ist recht eng (vgl. Abb. 23a). Man findet selten Hochwasserereignisse, die nicht mit größeren Niederschlagshöhen in der Pupplinger Au zusammentreffen. Das bedeutet, daß die zeitliche Niederschlagsverteilung in der Au etwa der des übrigen Isareinzugsgebietes bis zum Pegel Puppling entspricht, trotz dessen orographisch unterschiedlichen Aufbaus.



Übersichtskarte

Der Isarwasserstand wird an der Marienbrücke mit einem Schreibgerät registriert. Die Reihe der Wasserstandsmessungen reicht bis 1901 zurück, die der Abflußmessungen jedoch nur bis 1965. Das zum Pegel gehörige oberirdische Einzugsgebiet hat eine Fläche von 1714 km^2 . Der alpine obere Teil davon (bis zum Pegel Tölz) bedeckt eine Fläche von 1538 km^2 . Der Mittelwasserabfluß beträgt $50,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Abfluß bei MHW (2-jährige Wiederkehr) ohne den Loisach-Isarkanal wurde durch den Bau des Sylvensteinspeichers von etwa $800 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $500 \text{ m}^3/\text{s}$ verringert. Allgemein werden die Spitzen der Hochwasser um rund $300 \text{ m}^3/\text{s}$ vermindert.

Die Pupplinger Au nördlich der Marienbrücke und die Weidacher Au haben ein sehr dichtes Netz von Grundwassermeßstellen, das teils im Zusammenhang mit der Erstellung von Gutachten zur Beurteilung der generellen hydrogeologischen Verhältnisse, teils zur speziellen Untersuchung der Möglichkeit einer Grundwassererschließung eingerichtet wurde. Die Bohrungen reichen alle mindestens bis zur Seetonoberkante hinab. Allein in der Pupplinger Au sind 51 Meßstellen vorhanden, von denen 20 seit etwa 1968 mit Schreibgeräten ausgerüstet sind. Die übrigen sind meist 2"-Rammpegel. Drei Meßstellen wurden bereits am Anfang der sechziger Jahre mit Schreibgeräten versehen, die übrigen seit der gleichen Zeit wöchentlich angelesen. Mit der Erhöhung der Zahl der Schreibpegel wurde die Beobachtung der übrigen Meßstellen eingestellt. Viele der Pegel sind stark verockert, einige auch versandet und verschlammmt, obwohl sie von den Wasserwerken München wiederholt ausgepumpt wurden.

An den neun von der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde betreuten Meßstellen wurden seit 1968 wöchentlich Temperaturmessungen durchgeführt, wobei etwa 20 cm unter dem Grundwasserspiegel gemessen wurde. Verschiedentlich wurden ergänzend dazu Messungen über das ganze vertikale Profil vorgenommen. Die Verteilung der Meßstellen ist aus der Abb. 1 ersichtlich.

2. DER GEOLOGISCHE RAHMEN

Das Gebiet wurde bereits mehrfach auf geologischen Karten erfaßt: so auf der Karte 1:250 000 der Gegend von München von AMMON /2/, der geologischen Übersichtskarte 1:100 000 der Gegend von Bad Tölz von AIGNER /1/, dem Blatt Tölz 1:100 000 von FEICHTMEIER, LEBLING und WELTHOFER /20/, sowie der Geognostischen Karte von Bayern 1:100 000 Blatt München-Starnberg von KNAUER /32/. Die geologischen Verhältnisse des südlichen Teiles des Neufahrner Höhenrückens sind außerdem auf dem Blatt Nr. 8134 Königsdorf der Geologischen Karte von Bayern 1:25 000 von JERZ /28/ dargestellt. Für die geologische Bearbeitung des Gebietes wurde insbesondere die letztgenannte Kartierung mit den zugehörigen Erläuterungen herangezogen.

Das Isartal südlich von Schäftlarn ist glazialen Ursprungs und gehört zum Wolfratshauser Becken, einem der großen Zweigbecken des Isarvorlandgletschers. Die Talhänge werden teils aus würmeiszeitlichen Wallmoränen gebildet, teils sind sie aus den Schotterablagerungen älterer Eiszeiten aufgebaut, die von den Gletschern der Würmvereisung zerschnitten und ausgeräumt wurden. Die Basis der pleistozänen Ablagerungen sind die "Flinzsande und -mergel" der Oberen Süßwassermolasse. An den Talrändern stehen sie in einem schmalen Streifen am Fuß der Hänge an und verursachen vielfach Moorbildungen und Verlässungen. Im Inneren des Beckens haben die Gletscher die Oberfläche des Tertiärs tief ausgeschürft und mit Grundmoränen-Material überzogen.

Als sich im Spätglazial die Gletscher zurückzogen, sammelten sich in diesem Becken die Schmelzwasser und es entstand der Wolfratshauser See, der zur Zeit seiner größten Ausdehnung von Schäftlarn bis Penzberg reichte. Für die Wasserspiegellage in dieser Zeit gibt ROTHPLETZ /44/ 605 m ü. NN, JERZ /28/ ungefähr 600 m ü. NN an. Er wurde noch vor dem Ende des Pleistozäns durch die Isar, die sich immer tiefer in die Moränen und Schotter nördlich von Schäftlarn eingrub, zum Auslaufen ge-

Abb. 2

Geologische Übersichtsskizze

Ausschnitt aus der topographischen Karte Blatt 8034 (Starnberg-Süd)

M = 1 : 25000

Abb. 2

Geologische Übersichtsskizze

Ausschnitt aus der topographischen Karte Blatt 8034 (Starnberg-Süd)

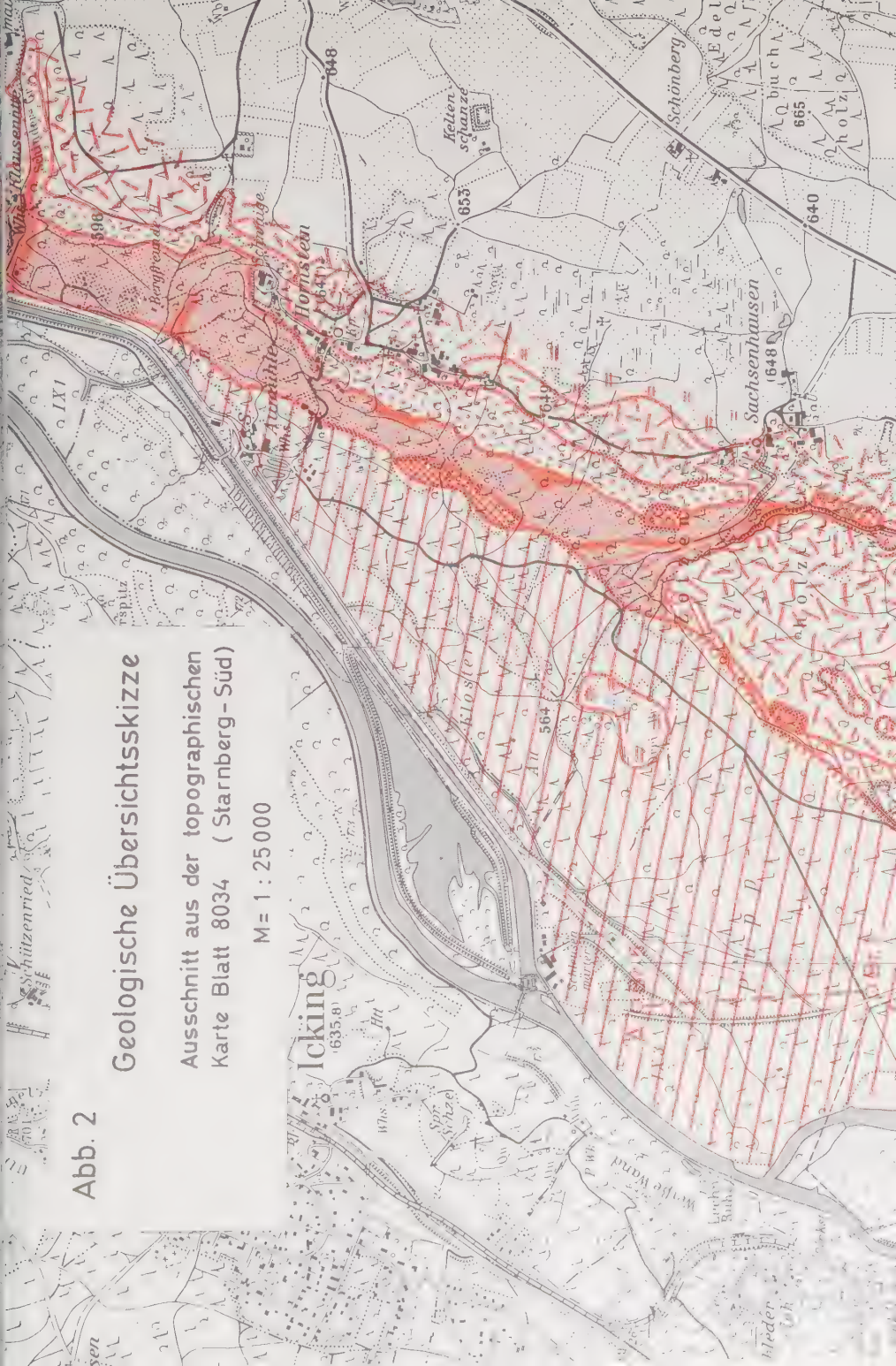
M = 1 : 25000

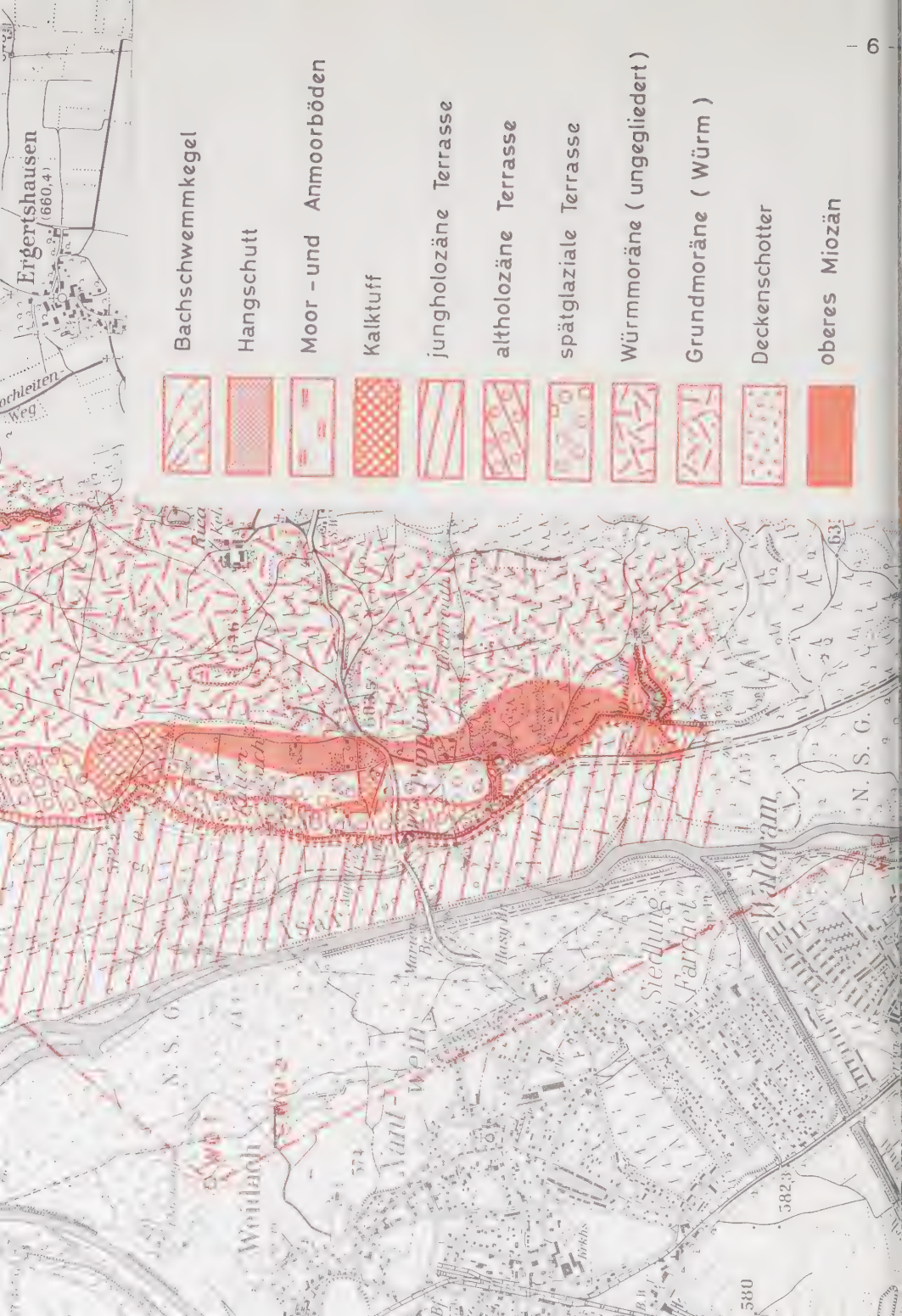
Abb. 2

Geologische Übersichtsskizze

Ausschnitt aus der topographischen Karte Blatt 8034 (Starnberg-Süd)

M = 1 : 25000





bracht. Die Sand- und Seetonablagerungen dieses Sees sind überall in dem Becken in wechselnder Mächtigkeit verbreitet. Sie werden überlagert von Isarschottern, die der Fluß als Delta in den See aufgeschüttet hat. Mit fortschreitender Eintiefung der Erosionsbasis nördlich von Schäftlarn schnitt sich die Isar unter Bildung mehrerer Terrassen in ihre eigenen Deltaschotter wiederum ein. Abb. 2 zeigt eine geologische Übersicht über das Gelände, die im folgenden erläutert wird.

2.1 TERTIÄR

Die tertiäre Basis der Glazialsedimente ist nur an den Talrändern und in tieferen Hangeinschnitten aufgeschlossen. Die größte zusammenhängende Fläche befindet sich in der Umgebung der Ortschaft Puppling. Nach Profilen von seismischen Schußpunktbohrungen der Firma Preußag zeigt die Tertiäroberfläche unter dem Neufahrner Höhenrücken ein flaches, unbewegtes Relief mit einer mittleren Höhenlage von 600 m ü. NN. In den seitlich anschließenden Zungenbecken - dem Eglinger und dem Wolfratshauser Becken - ist das Tertiär dagegen tief ausgeschürft. Die Maximaltiefen sind zwar unbekannt, nach Aufschlußunterlagen liegt jedoch die Tertiäroberkante jeweils unter 500 m ü. NN.

Die Schichten gehören der Oberen Süßwassermolasse (Torton, Sarmat) an. Sie bestehen aus Flinzmergeln, die im Süden stellenweise durch einen sandigeren Horizont überlagert werden. Die Kornverteilung einiger Proben ist auf Abb. 3 dargestellt. Die Mergel sind gut sortiert, der Kalkgehalt schwankt um 50 % und wächst mit ansteigendem Medianwert. Die Farbskala der Ablagerungen reicht von gelb bis grau. In frischem Zustand sind die hart, sehr dicht gelagert und wasserundurchlässig. Sie bilden den Grundwasserstauer der umliegenden Höhenzüge, wovon zahlreiche Quellen zeugen, die am Fuß der Hänge über dem Tertiär austreten. Bodenvernässungen und Moorbildungen lassen oft auf tertiären Untergrund schließen. In aufgeweichtem Zustand ist die leicht talwärts einfallende Flinzoberfläche häufig die Ursache für Hangrutsche und Anbrüche.

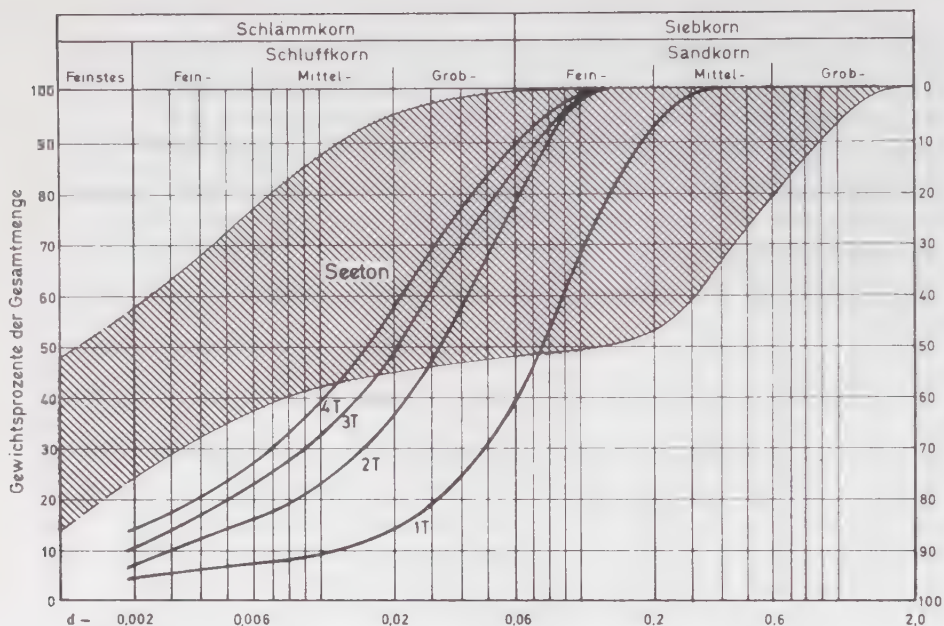


Abb.3: Kornverteilungen: Seeton und tertiäre Sande

2.2 DECKENSCHOTTER

Vom Nordrand des Gebietes bis in die Nähe des Riedbaches besteht der Abhang am Ostrand der Pupplinger Au aus Deckenschottern, die bis zur Ortschaft Hornstein großenteils als Nagelfluh aufgeschlossen sind. Sie liegen unmittelbar auf dem Tertiär und erreichen eine Mächtigkeit von knapp 50 m. Das Alter der Deckenschotter läßt sich nur schwer feststellen. Die Schußpunktprofile beweisen neben der allgemeinen Verbreitung der Deckenschotter unter den Moränen des Neufahrner Höhenzuges auch ihren Zusammenhang mit einem Schottervorkommen am West-

rand des Eglinger Beckens nördlich von Ascholding, das JERZ /28/ der Mindeleiszeit zuordnet.

Südlich von Hornstein zeigt das Relief der Schotteroberfläche tiefe parallele Rinnen, die zum Becken hin in die Luft ausstreichen. Es handelt sich dabei um Entwässerungsrinnen, welche die Hochfläche zum Becken hin entwässert haben. Ihre Fortsetzung verlief ursprünglich über Moränen, die den Schotterhängen vorgelagert waren und die später über der Tertiäroberfläche abgerutscht sind. Der hydrostatische Druck des im Schotter befindlichen Grundwassers gegen das undurchlässigere Moränenmaterial mag diesen Vorgang beschleunigt haben. Das Blockbild Abb. 4 skizziert die heutige Situation.

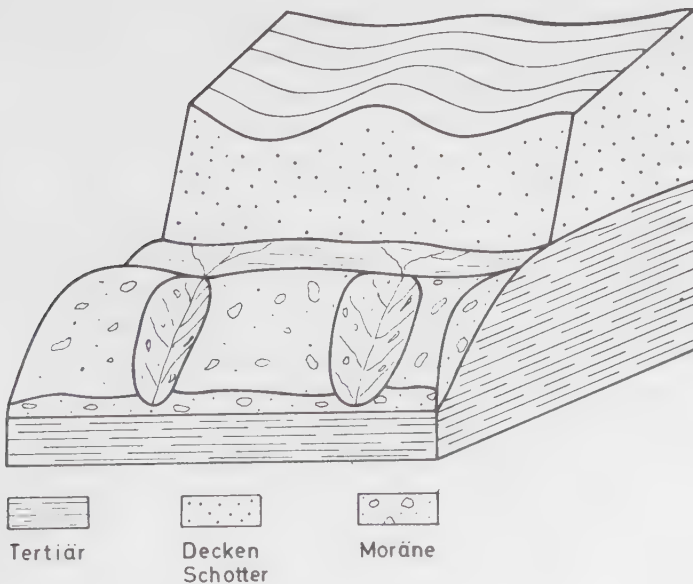


Abb.4: Talhang südl. von Hornstein (schematisch)

2.3 WÜRMORÄNEN

2.3.1 W a l l m o r ä n e n

Die Moränenwälle, die den nördlichen Ausläufer des Wolfraths-
hauser Beckens umgeben, gehören der zweiten Rückzugsphase der
Würmeiszeit, der Münsinger-Ickinger Phase, an. Die älteren
Stadien reichten weiter nach Norden und umrahmten den noch
weniger gegliederten Gletscherlobus in weitgespanntem Bogen,
die jüngeren Rückzugs-Moränen finden sich weiter im Inneren
des Zweigbeckens. Eine anschauliche Kartendarstellung der
Würmeiszeitlichen Moränenzüge findet sich bei ROTHPLETZ /44,
Kartenanlage 2/. KNAUER /33/ vertrat die Auffassung, daß
es sich bei diesem Moränenzug um eine überfahrene Endmoräne
eines frühwürmeiszeitlichen Vorstoßstadiums handele. Nach
TROLL /53/ und JERZ /28/ dagegen liegen hierfür keine hin-
reichenden Beweise vor. Formen und Erscheinungen, die auf eine
überfahrene Moräne schließen lassen, wie z.B. die Überlagerung
von Endmoränenmaterial durch Grundmoräne, können nach diesen
Autoren durch Gletscheroszillationen während einer Stillstands-
phase hervorgerufen worden sein. Der innere Moränenzug folgt
unmittelbar dem Talrand des Wolfrathhauser und des Eglinger
Zungenbeckens und lehnt sich teilweise an die Beckenflanken
an. Diese Moräne bildet die rechte Begrenzung des engeren
Untersuchungsbereiches vom Südrand bis zum Riedbacheinschnitt.
Sie erhebt sich bis zu einer Höhe von etwa 60 m. In ihrem
Kern wurden noch Deckenschotter angetroffen. Die Quelle des
"Kalten Baches", die nördlich von Puppling am Fuß der Moräne
über dem Flinz austritt, wird aus diesen Schottern gespeist,
was sich aus dem Chemismus (siehe Tab. 9), der stets gleich-
bleibenden Schüttung und der von der Jahreszeit weitgehend
unabhängigen Temperatur schließen läßt.

2.3.2 G r u n d m o r ä n e

Würmeiszeitliche Grundmoräne ist im Arbeitsgebiet an wenigen
Stellen aufgeschlossen. Reste liegen am Ortsrand von

Puppling auf Tertiär. Im tiefen Einschnitt des Eisgrabens ist Grundmoräne angeschnitten, die der Bach einst unter seinem Schuttkegel begraben hat. Grundmoräne überzieht nicht nur die Schotterflächen zwischen den Wallmoränen auf den Höhenrücken, sondern kleidet auch das ganze innere Zungenbecken aus: Sie wurde unter Seetonen im Brunnen 5 in acht Meter und im Brunnen 1 in 53 m Tiefe unter Gelände angetroffen (Abb. 1). Die mit 120 m tiefste Bohrung WD1 traf die Oberfläche der Moräne jedoch ebensowenig wie die etwa 100 m südöstlich angesetzte Bohrung WD2 mit einer Tiefe von 60 m (Unterlagen der Firma Etschel und Meyer). Damit erreicht das Wolfratshauser Zweigbecken an dieser Stelle seine größte, bisher bekannte Tiefe. Die Tertiäroberfläche liegt hier unter 450 m ü. NN. Weiter im Süden bei Waldram dagegen steht Grundmoräne im Flußbett der Isar an. Das Profil auf Abb. 5 zeigt einen Längsschnitt vom Ickinger Wehr bis Waldram.

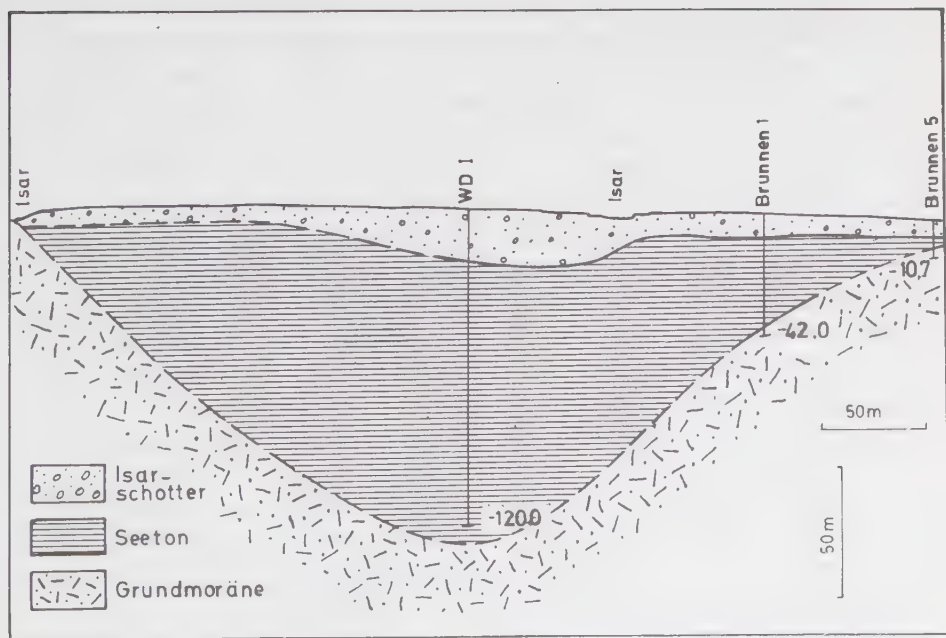


Abb. 5

Profil A-A

Die ungewöhnlich starke Eintiefung, die sich von Süden wie von Norden gleichermaßen steil absenkt, läßt vermuten, daß es sich um ein Zungenbecken handelt, das hier unter besonderen Umständen entstanden ist. So enden zum Beispiel am Nordrand der Vertiefung die jüngsten Wallmoränenzüge. Die beträchtliche Tiefe und die eigenartige Form überschreiten in ihren Abmessungen allerdings erheblich die von KLEBELSBERG /31, I, S. 365/ angegebenen Durchschnittswerte von Zungenbecken. Danach soll die Tiefe nicht mehr als 1/100 der Länge betragen, während hier das Verhältnis mit ungefähr 1/40 mehr als doppelt so groß ist. Im folgenden wird versucht, dieses eigenartige Profil zu erklären.

Innerhalb der Eismechanik wird die mathematischen Plastizitätstheorie zur Deutung der Gletscherbewegung angewandt. Dort unterscheidet man bei den Spannungszuständen im Eis zwischen "Stauchung" als dem passiven und "Streckung" als dem aktiven Spannungszustand (KÖRNER /34/). Bezeichnet man in einem orthogonalen Achsenkreuz die x-Achse als die Bewegungsrichtung und die y-Achse als die Eisdicke, dann ist bei Stauchung die Druckspannung σ_x größer als σ_y , bei Streckung dagegen σ_y größer als σ_x . Von Blockbewegung spricht man, wenn σ_x und σ_y einander gleich sind. Verfolgt man im Eis die Hauptschubspannungsrichtungen, so erhält man zwei orthogonale Liniensysteme, die zusammen als Gleitlinienfelder bezeichnet werden. Die Gleitlinien geben gleichzeitig die Richtungen größter Geschwindigkeit und bei Gletschern die Bewegungsrichtung von aufgenommenem Gesteinsmaterial im Eis an. Da nun beim Zustand der Stauchung die Schubspannung und die Bewegung entlang der von der Sohle zur Gletscheroberfläche auftauchenden Gleitlinien deutlich überwiegt, kann Sohlenmaterial aufgenommen und im Eis transportiert werden: Der Gletscher erodiert. Bei Streckung dominieren die absteigenden Gleitlinien und der Gletscher kann akkumulieren. Der aktive Bewegungszustand herrscht besonders im Nährgebiet und bei Bewegung über konvex gekrümmter Sohle, der passive Zustand im Zehrgebiet bzw. über konkav gekrümmter Sohle und an Stellen, an denen Moränen das Vordringen des Eises behindern.

Diese Vorstellungen aus der Gletschermechanik lassen sich folgendermaßen auf die Verhältnisse bei der Entstehung des Wolfratshauser Zungenbeckens übertragen: Bei seinem Rückzugshalt in diesem Gebiet hatte sich der Vorland-Gletscher erstmals in einzelne, den Talgletschern ähnliche Zungen aufgespalten, die sich auf die tiefsten Rinnen zurückzogen. Während vorher die "Stromlinien" des Gletschers vom Stammbecken zum Außenrand auseinanderliefen, wurden sie jetzt innerhalb der Rinne in paralleler Richtung zusammengefaßt; damit wurde die Erosionstätigkeit erheblich gesteigert. Die trompetenartige Verengung des Tales nach Norden zu mag die Stauchung und damit die Erosionswirkung noch verstärkt haben. Der bemerkenswert steile Abfall der Mulde von Süden her kann auf diesem Weg ebenfalls gedeutet werden: Am oberen, konvex geformten Rand einer Stufe oder eines Hanges wird vom Gletscher akkumuliert, am konkav geformten Hangfuß dagegen erodiert, so daß Höhe und Steilheit zunehmen. Der deutlich asymmetrische Querschnitt des Zungenbeckens - die Westflanke ist steiler als die Ostflanke - kann durch die Talkrümmung erklärt werden: Die Stauchung und damit wieder die Erosion ist am Außenrand - hier am Westrand - größer als am Innenrand. Der hier angeführte Deutungsversuch setzt voraus, daß der Verlauf dieses nördlichsten Ausläufers des Wolfratshauser Beckens bereits vor dem erwähnten Gletscherhalt angelegt war.

Ähnliche Verhältnisse wie im Untersuchungsgebiet finden sich in abgeschwächter Form im kleineren Eglinger Zungenbecken: Hier war in einer Schußpunktbohrung die Tertiäroberfläche bei 503 m ü. NN noch nicht erreicht.

2.4 SPÄT- UND POSTGLAZIALE BILDUNGEN

2.4.1 S e e t o n

Die Ablagerungen des Wolfratshauser Sees haben die über-tiefen Zungenbecken weitgehend wieder aufgefüllt. Sie

bilden heute in den Isarauen, dem eigentlichen Untersuchungsgebiet, den Grundwasserstauer. Bedeutsam für die Grundwasserverhältnisse sind daher die Reliefunterschiede in der Seetonoberfläche. Diese ist durch zahlreiche, von den Wasserwerken München abgeteufte Aufschlußbohrungen gut bekannt (siehe Abb. 6). Während sie in der Pupplinger Au eine flach gewellte, nach Norden leicht abgedachte Fläche darstellt, formt sie im Bereich der Weidacher Au eine nach Norden aushebende Rinne, die im Süden, in der Gegend von Weidach, eine Tiefe von über 40 m erreicht. Die steile Rinnenflanke, streicht NNE-SSW. Sie unterquert die Isar bei der Loisachmündung, wodurch der westliche Teil der Pupplinger Au noch mit in ihren Bereich einbezogen wird. Bohraufschlüsse, die beim Bau des Ickinger Wehres gewonnen wurden, zeigen an, daß die Rinne dort bereits geschlossen ist. Ihre Entstehung dürfte auf die lokalen Strömungsverhältnisse im Wolfratshauser See zurückzuführen sein. Darauf weisen auch Sandablagerungen hin, die im tiefsten Teil der Rinne mit einer Mächtigkeit von mehreren Metern erbohrt wurden.

Die Zusammensetzung der Seeablagerungen wurde an 22 Proben aus der Bohrung WDI untersucht. Sieb- und Schlämmanalysen wurden nach dem von FABRICIUS & MÜLLER /19/ angegebenen Verfahren durchgeführt und mit dem dort beschriebenen Computerprogramm ausgewertet. Die Ergebnisse der Körnungsuntersuchungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Sie enthält als statistische Parameter zur Kennzeichnung der Kornverteilung die zentralen Momente erster bis vierter Ordnung (Mean bis Exzess), dazu als Ergänzung und zu Vergleichszwecken die in der Sedimentologie eher geläufigen Parameter von FOLK /23/, sowie den Sortierungskoeffizient nach TRASK /52/. Die Unterschiede in den Werten für Schiefe und Exzess auf der einen und den entsprechenden FOLK'schen Werten auf der anderen Seite erklären sich dadurch, daß bei FOLK nicht alle Fraktionen in die Berechnung eingehen, sondern nur einige Quantile der Summenkurve berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Seetonprofil in der Weidacher Au

	Mean /Phi/	Streuung /Phi/	Schiefte	Schiefte nach FOLK	Exzess	Exzess nach FOLK	Sortierung nach TRASK
m. u. Gelände Seeton							
34	1,93	3,57	0,9	0,34	3,01	1,16	4,39
40	7,52	3,08	-1,05	-0,52	3,08	1,01	3,68
44	7,17	3,29	-0,82	-0,50	2,34	0,87	4,99
48	8,58	1,88	-1,00	-0,38	4,33	0,76	2,71
52	8,69	1,70	-1,13	-0,26	5,30	0,79	2,39
56	7,41	3,09	-0,93	-0,50	2,60	1,02	3,62
60	7,93	2,71	-1,23	-0,46	3,71	1,15	3,04
64	7,08	3,35	-0,83	-0,48	2,42	0,91	4,90
68	6,67	3,56	-0,70	-0,43	2,20	0,73	7,88
72	7,67	2,76	-1,20	-0,36	3,93	1,13	3,21
76	7,16	3,19	-0,89	-0,43	2,71	0,98	4,33
80	4,48	3,96	0,22	0,29	1,49	0,59	14,45
84	5,50	4,02	-0,23	-0,27	1,50	0,58	16,20
88	7,15	3,34	-0,96	-0,49	2,75	1,01	4,19
92	6,79	3,42	-0,73	-0,41	2,26	0,91	4,94
96	6,56	3,56	-0,57	-0,40	1,89	0,64	9,94
100	6,35	3,72	-0,53	-0,37	1,81	0,50	12,57
104	4,56	4,06	0,21	0,45	1,36	0,56	16,12
108	6,63	3,55	-0,60	-0,42	1,91	0,63	10,39
112	5,40	3,96	-0,13	-0,21	1,42	0,56	15,72
116	5,33	3,94	-0,10	-0,20	1,45	0,45	16,31
120	5,41	3,84	-0,16	-0,15	1,56	0,57	14,72
Proben-Nummer Tertiär							
1 T	4,16	1,744	1,595	0,361	6,04	1,48	3,99
2 T	5,50	1,86	1,12	0,43	3,52	1,10	2,24
3 T	6,02	1,94	0,70	0,28	2,69	0,98	2,55
4 T	6,32	1,97	0,52	0,21	2,48	1,00	2,57

Die Kornverteilung (siehe Abb. 3) ist fast durchgehend bimodal mit einer ausgeprägten Spitze im Feinsandbereich und einem zweiten unscharfen Maximum im Schluff-Ton-Bereich. Der mittlere Korndurchmesser (Mean) liegt zwischen 4.4 und 8.7 Phi, die Streuung bei 3.3 Phi. Die Schiefe ist fast durchweg negativ. Der Karbonatanteil schwankt zwischen 50 % und 70 % bei einem Calzit/Dolomit-Verhältnis von etwa 1:1. Vergleicht man das Calzit/Dolomit-Verhältnis mit dem Median entlang dem vertikalen Profil (Abb. 7), so zeigt sich eine leichte Verschiebung zum Dolomit bei zunehmendem Korndurchmesser (d.h. abnehmenden Φ -Werten), was mit der größeren Härte von Dolomit erklärt werden kann. Vergleicht man diese Werte mit Untersuchungsergebnissen von JERZ /28/ über Kornzusammensetzung und Karbonatgehalt von Seetonen aus dem südlichen Wolfratshauser See, so ergeben sich Abweichungen im Sand- und Karbonatanteil: Letzterer ist im Süden geringer und der Feinsandanteil fehlt dort gänzlich. Die Differenzen werden verursacht durch die Auswaschung gröberen Materials aus den Wallmoränenzügen, die hier im Norden den schmalen Seearm eng umsäumen. Die auffällige Bimodalität der Verteilung läßt hier auf eine unterschiedliche Herkunft der Komponenten schließen.

2.4.2 Isarschotter

Nach JERZ /28/ hat die Isar im Spätglazial zwei Deltas im Wolfratshauser See aufgeschüttet, von denen das jüngere und weiter im Süden bei Buchberg ansetzende bis in das Gebiet der Pupplinger Au reichte. Reste davon finden sich bei der Ortschaft Puppling in einer Höhe von 590 - 595 m ü. NN, teils über Grundmoräne, teils unmittelbar über Tertiär. Sie hängen wohl zusammen mit einem kleinen Schottervorkommen etwa 3 km weiter südlich an der Spitze des Neufahrner Höhenrückens, dessen Oberfläche auf einer Höhe von 600 m ü. NN liegt. Durch eine bei Puppling etwa 7 m hohe Terrassenkante getrennt folgt talwärts eine schmale Terrassenfläche, die im Postglazial

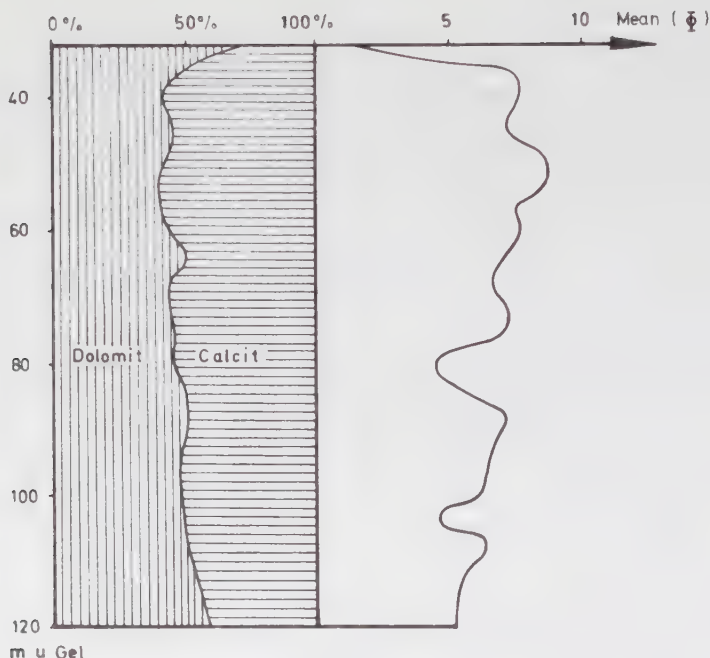


Abb. 7: Bohrprofil WD I: Calcit-Dolomit-Verhältnis
und mittlerer Korndurchmesser

durch Ausräumen des Deltaschotterkörpers entstanden ist. Von dieser altholozänen Fläche gelangt man schließlich über eine weitere, etwa 4 m hohe Terrassenstufe auf die eigentliche jungholozäne Talsohle hinab. Diese letzte Stufe beginnt bei der Ortschaft Puppling und verliert sich erst knapp südlich des Riedbaches. Ein deutliches Unterscheidungsmerkmal für das Alter der Terrassenflächen ist die Bodenentwicklung, die über den Spätglazialen Schottern bis zur Braunerde (Parabraunerde), auf den holozänen Terrassen jedoch nur bis zur Rendzina fortgeschritten ist.

Die holozänen Isarschotter liegen im Gebiet der Pupplinger und der Weidacher Au bis auf schmale Randstreifen direkt auf den glazialen Seeablagerungen des Wolfratshauser Sees. Diese Schotter bilden im gesamten Untersuchungsbereich den

Grundwasserleiter. Einen Einblick in ihre Lagerungsverhältnisse und Zusammensetzung vermittelt eine ausgedehnte Kiesgrube auf der altholozänen Terrasse. Die wechsellagernden Bänke aus Sand, sandigem Kies und Kies lassen sich in Schüttungsrichtung über 10 bis 20 Meter verfolgen und sind deutlich gegeneinander abgesetzt. Ihre Mächtigkeit ist meist gering: Sie beträgt selten über 50 cm. Quer zur Schüttungsrichtung sind die Bänke flach gewölbt und allgemein kürzer. Vielfach tritt Bogen- und Schrägschichtung auf. Die Sandbänke bestehen aus gut sortiertem Mittel- bis Grobsand; in den teilweise gut ausgewaschenen Kieslagen reicht die Körnung von Mittel- und Feinkies bis zu Grobkies mit Steinen.

Auf dem jungholozänen Talboden liegen die Verhältnisse etwas anders: Bevor dort ein Hochwasserdamm gebaut und durch künstliche Eingriffe die Abflußverhältnisse der Isar merklich verändert wurden, überfluteten die Hochwässer noch wiederholt die gesamte Au bis zur ersten Terrassenstufe. Sie bewirkten Umlagerungen und Anlandungen, die den Charakter der Sedimente im oberflächennahen Bereich veränderten: Häufig sind die Kies-Sande verschlufft, und in Mulden und Altarmen wird toniges bis mergeliges Material abgesetzt.

Die Oberfläche der Schotter ist eben, sie fällt mit 4 ‰ nach Norden ein. Die Mächtigkeit nimmt - ausserhalb der Rinne unter der Weidacher Au - ebenfalls nach Norden ab: Bei der Bohrung 21 liegt die Seetonoberfläche in 11 m Tiefe, 2,5 km weiter im Norden bei der Bohrung 20 dagegen in nur 3,5 m Tiefe unter Gelände. Die Durchlässigkeitsbeiwerte sind im ganzen Gebiet sehr hoch, wobei die Verteilung keinerlei regionale Abstufung erkennen läßt. Die Wasserwerke München haben an 24 Pegeln, die den Schotter durchteufen, k_f -Wert-Profile durch Kleinpumpversuche gemessen. Die Mittelwerte für die einzelnen Profile schwanken zwischen $2,8 \cdot 10^{-2}$ und $0,25 \cdot 10^{-2}$ m/s, ein arithmetisch gemittelter Gebietswert beträgt $1,1 \cdot 10^{-2}$ m/s. Im Rahmen von radiohydrometrischen Messungen der Grundwasser-Strömungsrichtungen im Gebiet der

Pupplinger Au durch das Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung m.b.H. München wurde an den Pegeln H, I und L (siehe Abb. 1) v_f -Wert-Bestimmungen mit radioaktiven Isotopen durchgeführt. Über die Methode siehe DROST et al. /15/. Die Ergebnisse ergaben nach Umrechnung recht gute Übereinstimmungen mit den aus Pumpversuchen ermittelten k_f -Werten (siehe Tab. 2).

Tabelle 2: Vergleich von k_f -Werten aus Pumpversuchen und aus Isotopenmessungen

Pegel	Pumpversuch	Isotopenmessung
H	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$0,38 \cdot 10^{-2}$
J	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-2}$
L	$2,22 \cdot 10^{-2}$	$2,31 \cdot 10^{-2}$

2.4.3 Kalktuff

Häufig finden sich über undurchlässigem Tertiär Kalkausfällungen in Form von festen Kalktuffen, Kalktuffsand, Schilf-Tuff und Quellkalk (JERZ /28/). Die sehr harten Grundwässer, die aus den Schottern und Moränen hervortreten, verlieren ihren Kalkgehalt durch Erwärmung, CO_2 -Entbindung und unter Mitwirkung von niederen Pflanzen. Die Kalkausscheidungen finden sich

- in Bächen, wo sie regelrechte Sinterterrassen aufbauen können (Kalter Bach bei Puppling),
- auf flach geneigten Wiesen- und Schilfhängen (oberes Riedbachtal, am Talrand über dem Moränenfuß südlich von Puppling),
- randlich über Moor oder unter schluffig-lehmigem Kolluvium (südlich von Puppling).

An zwei kleinen Bächen, in denen eine unterschiedliche Kalktuffabscheidung zu beobachten war, wurden an einem heißen Sommertag stichprobenhaft Untersuchungen über die Veränderungen im Kalkgehalt des Wassers gemacht. Wasserproben aus den unmittelbar über der Basis der Schotter austretenden Quellen wurden verglichen mit Proben, die etwa 150 - 200 m unterhalb entnommen waren. Die Analysenwerte zeigt Tabelle 3. Die unter I angeführten Werte beziehen sich auf einen Bach, der ein mächtiges Kalktuffpolster abgesetzt hat, während im anderen nur stellenweise Kalktuffsand anzutreffen ist. Die Fließbedingungen sind in beiden Fällen ungefähr gleich. Die Ergebnisse unterscheiden sich etwas voneinander: Bei II ist der Anstieg des pH-Wertes infolge von Kohlensäureverlust ebenso wie die Abnahme des Lösungsgehaltes und der Karbonathärte trotz einer stärkeren Temperaturzunahme geringer. Der Unterschied läßt sich durch einen größeren Anteil an organisch gefällttem Kalk bei I erklären.

Tabelle 3: Veränderung der Härte mit dem Fließweg von Bächen der Pupplinger Au

	I		II	
	Quelle	200 m unterhalb	Quelle	200 m unterhalb
Gesamthärte °dH	19,18	14,95	17,92	15,74
Karbonathärte °dH	16,55	13,92	16,52	14,03
pH	7,3	8,0	7,5	7,9
T (° C)	8,3	12,0	8,5	14,0

An einigen Stellen wurde früher Kalktuff gebrochen und in Wolfratshausen und Puppling als Baumaterial verwendet. Die heute überwachsenen Gruben sind besonders auf der nördlichen Seite der Straße nach Sauerlach sowie im Wald unterhalb der Quelle des Kalten Baches zu finden. Beide Vorkommen liegen in heute trockenen Bachbetten.

3. D I E I S A R

3.1 DIE ENTWICKLUNGSGESCHICHTE

Die präglaziale Isar scheint nach SCHAEFER /45/ in ihrem Unterlauf nördlich der Münchener Schotterebene schon immer ihr heutiges Tal durch das tertiäre Hügelland benutzt zu haben. Ihr Oberlauf dagegen nahm vor der letzten Vereisung einen anderen Weg als heute: Er wurde bei Reichersbeuern durch Bohraufschlüsse und Seismik nachgewiesen (SCHMIDT-THOMÉ /47/).

Als sich im Spätglazial der Isarvorlandgletscher endgültig in die Alpentäler zurückzog, bildete sich im Alpenvorland innerhalb der jüngsten Endmoränenwälle eine Kette von Seen, deren Überlaufstellen zuerst die Entwicklung der Isar bestimmten: Es waren der Wolfratshauser See, der Rottach-See und der Tölzer See. Der Wolfratshauser See hatte zwar durch das Gleißental zunächst noch einen zweiten Abfluß, doch die Erosion schritt nördlich von Schäftlarn schneller voran, so daß das Gleißental trocken fiel. Im Laufe der Zeit schüttete die Isar mächtige Schotterdeltas in den Seen auf, die schließlich zusammen mit der Erosion an den Überlaufstellen eine Verlandung bewirkten.

Die Loisach entwickelte sich aus dem ehemals erheblich größeren Kochelsee, bzw. dessen Überlauf bei Rain. Sie floß zunächst in den Wolfratshauser See, mit dessen Verlandung ihr heutiges Tal entstand.

3.2 DIE DERZEITIGEN GESTALTUNGSVORGÄNGE

Bis in die Mitte des vergangenen Jahrhunderts standen die bettbildenden Kräfte der Isar im Gleichgewicht. Das im allgemeinen sehr breite Flußbett war von einer Vielzahl von Einzelarmen und Rinnen durchzogen, die sich netzartig verzweigten und in der Regel meist nach kurzem Lauf wieder vereinigten. Die ausgedehnten freien Kiesflächen, die den Fluß begleiteten, wurden bei Hochwässern, die mehrfach im Jahr im Frühjahr und im Sommer auftraten, überschwemmt und umgelagert. Weniger häufig überflutete Flächen gaben Raum für eine ausgeprägte Auenvegetation, deren Pflanzengesellschaften je nach Überflutungshäufigkeiten bzw. Flurabständen eine charakteristische Zusammensetzung aufwiesen (SEIBERT /49, 50/). Dieser, heute an keiner Stelle des Flußlaufes mehr bewahrte Urzustand der Isar war an vielen Streckenabschnitten des Flusses für Siedlungen, Landverkehrsverbindungen und die Flößerei störend und gefährlich. Die ersten Eingriffe des Menschen in diesen ursprünglichen Zustand waren daher als Schutzmaßnahmen geplant. So wurde die Pupplinger Regulierung zunächst zur Sicherung der Marienbrücke ausgeführt. Nach dem Ersten Weltkrieg kam in großem Maßstab die Energiegewinnung als Beweggrund für weitere tiefgreifende Veränderungen hinzu. Heute ist der Fluß fast auf seiner ganzen Länge aus seinem natürlichen Gleichgewicht gebracht, und strebt einem neuen, den veränderten Verhältnissen angepaßten Zustand zu. Auch die wenigen Flußabschnitte, die noch ungefähr einen Eindruck der früheren Verhältnisse vermitteln - wie die Pupplinger Au und die südlich daran schließende Ascholdinginger Au - sind im Begriff, ihren Charakter grundlegend zu wandeln.

Sollen nun die Auswirkungen künstlicher Eingriffe auf den Fluß und die dadurch bedingten Entwicklungstendenzen in einem begrenzten Bereich, wie der Pupplinger Au untersucht werden, so müssen in die Betrachtungen alle oberhalb des Untersuchungsgebietes vorgenommenen Eingriffe einbezogen werden. Als empfindlicher Gradmesser für das Ausmaß der jeweils

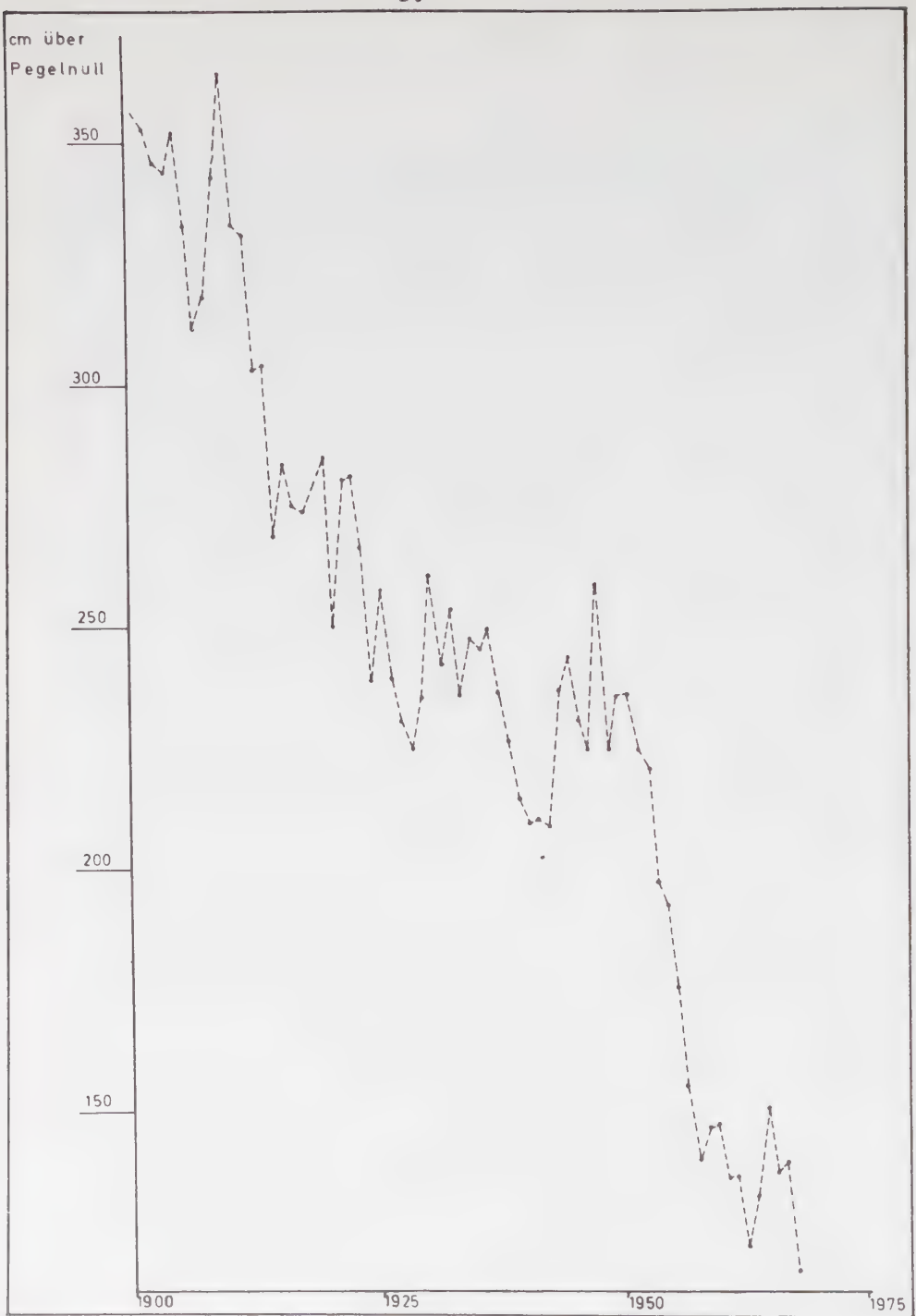


Abb. 8a: Jahresmittel der Isarwasserstände am Pegel Puppling

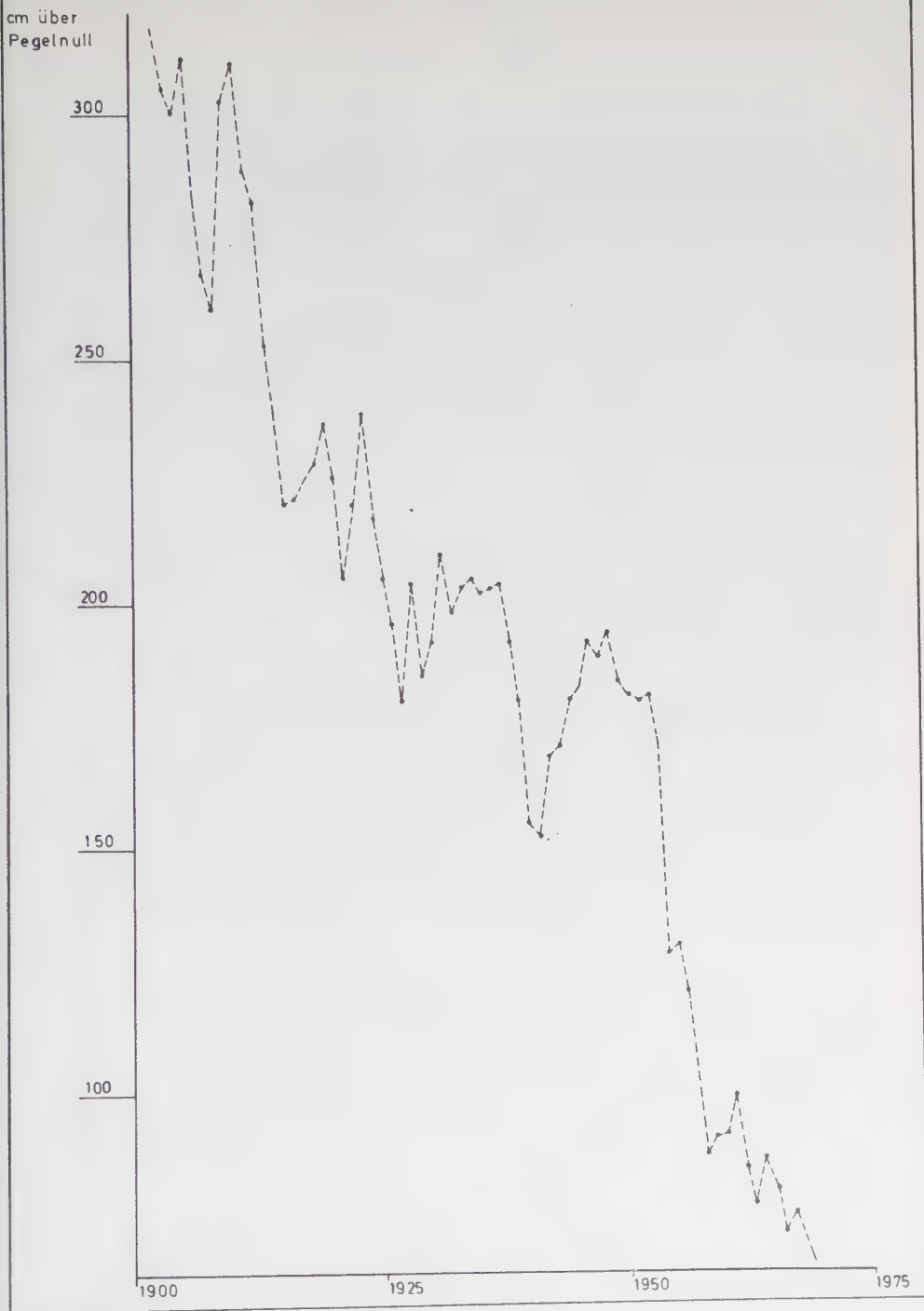


Abb.8b: Jahresminima der Isarwasserstände am Pegel Puppling

bewirkten Veränderungen erweisen sich die Jahresmittel und die Jahresminima der Wasserstände am Pegel Puppling, wie sie die Jahrbüchern des Donaugebietes der Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde /6/ enthalten. Auf den Abbildungen 8a und 8b sind diese Werte für den Zeitraum von 1902 bis 1969 aufgetragen. Die beiden Darstellungen sagen im Prinzip das gleiche aus: Die auf beiden gleichzeitig auftretenden und über mehrere Jahre hinweg verfolgbaren Tendenzen unterschiedlicher Eintiefung, seltener auch Auflandung, spiegeln offenbar die Veränderungen der Gerinnesohle wider und lassen so die Einflüsse erkennen, die im Laufe der Zeit wirksam geworden sind.

Nachfolgend werden nun die Eingriffe in das Flußregime, soweit sie die Verhältnisse in der Pupplinger Au beeinflusst haben, in chronologischer Reihenfolge betrachtet (Gutachten der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde /7/).

Einen unmittelbaren und sehr deutlich sichtbaren Einfluß hatte zunächst die Regulierung der Isar bei Puppling selbst, die schon 1854 zum Schutz der Marienbrücke begonnen wurde. Besonders die steile Eintiefungsphase nach 1910/11 ist hierfür ein Beispiel, da in diesem Jahr im Zuge der Übernahme der Unterhaltung durch die staatliche Wasserbauverwaltung die Regulierungsstrecke um etwa 300 m verlängert und die älteren Anlagen erneuert wurden. Die Korrektur reicht seither von Fluß-km 179,6 bis km 177,3.

In den Jahren 1919 bis 1923 begann der groß angelegte Ausbau der Isar zur Energiegewinnung. Als in diesem Zusammenhang wichtigste Maßnahmen wurden dem Fluß beim Krüner Wehr bei Wallgau bis zu $25 \text{ m}^3/\text{s}$ entzogen und zum Walchensee übergeleitet. Diese Wassermenge wird der Isar nach Nutzung durch das Walchenseekraftwerk durch den seit 1923 betriebenen Loisach-Isar-Kanal wieder zugeleitet.

Im Bereich der Pupplinger Korrektur ist in den darauffolgenden Jahren von 1923 bis 1927 eine deutliche Eintiefung festzu-

stellen. Sie findet ihre Erklärung darin, daß der ehemals im Isarbett beim Geschiebetransport wirksame Abfluß nunmehr geschiebefrei durch den Kanal zufließt und sein überschüssiges Transportvermögen mit örtlich aufgenommenen Sohlenmaterial absättigt.

Zwischen den Jahren 1937 und 1941 zeigt sich erneut ein verstärkter Trend zur Sohleneintiefung. In diesem Fall ließ sich jedoch nicht feststellen, welche Ursache unmittelbar hierfür verantwortlich ist. Um das Jahr 1937 wurden offenbar weder die Abflußverhältnisse in irgend einer Form geändert, noch wurden bauliche Veränderungen an der Korrektur selbst vorgenommen. Es erscheint jedoch nicht ausgeschlossen, daß um diese Zeit größere Kiesmengen für Bauzwecke im Raum Geretsried entnommen worden sind.

Die nächste auffällige Eintiefungsphase folgt auf weitere schwerwiegende Eingriffe in die Abflußverhältnisse der Isar. In dem Zeitraum zwischen 1948 und 1950 wurden zwei alpine Nebenflüsse der Isar umgeleitet. Seither fließt der Rißbach-abfluß bis zu $12 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einer Mittelwassermenge von $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ in den Walchensee und erst über den Loisach-Isar-Kanal frei von Geschiebe wieder in das Flußbett der Isar. Der Dürrach-abfluß mit einem MQ von $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$ und damit dessen gesamte Feststoff-Fracht werden dem geschiebeführenden Abfluß der Isar entzogen und zum Achensee hinübergeleitet. Dort wird die Dürrach ebenfalls zur Energiegewinnung ausgenutzt. Addiert man alle abgezweigten Wassermengen, so werden im Mittel $29,9 \text{ m}^3/\text{s}$ des beim Geschiebetransport wirksamen Abflusses entzogen, von denen $21,0 \text{ m}^3/\text{s}$ - das sind mehr als 40 % vom MQ mit $50,6 \text{ m}^3/\text{s}$ - ohne Geschiebe wieder zugeleitet werden. Unterhalb der Kanaleinmündung wird also das Transportvermögen der Isar sprunghaft erhöht.

Während den bisher erwähnten Maßnahmen die resultierenden Eintiefungsphasen unmittelbar folgten, werden die nun zu behandelnden Eingriffe - der Bau der Sylvensteinsperre und

des Kraftwerkes Tölz I - erst jetzt allmählich wirksam, obwohl die Bauzeit bereits 10 Jahre zurückliegt. Ihr Einfluß läßt sich daher auch nicht in so ausgeprägter Form am Pegel verfolgen, sondern er erstreckt sich gleichmäßig auf den gesamten Fluß unterhalb der Sperrenstellen. In diesem Bereich wurden hinsichtlich der Gerinneveränderungen die vorhandenen Tendenzen verstärkt und neue Entwicklungen eingeleitet.

Der Sylvensteinspeicher mit seinen 82 Mio m³ Stauraum wurde in den Jahren 1956 bis 1959 errichtet. Zweck des Bauwerkes ist in erster Linie die Niedrigwasseraufbesserung und der Hochwasserschutz, dazu untergeordnet die Stromerzeugung. Das seit 1961 betriebene Kraftwerk Bad Tölz nutzt den Isarabfluß bis zu 30 m³/s. Sowohl im Sylvensteinsee wie auch im Stauraum des Kraftwerkes Tölz wird jeweils das gesamte Geschiebe des Flusses zurückgehalten. Im Sylvensteinspeicher gingen nach BAUER & BURZ /5/ im Zeitraum von 1959 bis 1966 jährlich etwa 170 000 m³ Stauraum durch Feststoffablagerungen - also Geschiebe und Schwebstoff - verloren. In der Staustufe Tölz waren es in gleichen Zeitraum etwa 37 000 m³, so daß man inzwischen, um den Stauraum zu erhalten, mit Kiesentnahmen in ungefähr dieser Größenordnung begonnen hat. Bedingt durch den Geschiebemangel unterhalb der Sperrenstellen, befindet sich der Fluß im Stadium kontinuierlicher Eintiefung. Oberhalb der Einmündung des Loisach-Isar-Kanals haben sich auch die Abflüsse verringert, so daß die Eintiefung dort verlangsamt wurde, unterhalb der Einmündung jedoch wirkt zusätzlich der fast geschiebefreie Kanalabfluß mit und beschleunigt den Vorgang.

Einen Eindruck von dem Ausmaß der geschilderten Einflüsse auf den Geschiebehaushalt vermittelt eine Zusammenstellung der zwischen Icking und München gebaggerten Kiesmengen. In diesem Flußabschnitt wird der weitaus größte Teil des Geschiebes zum Schutz der dort erstellten Kraftwerke entfernt. Das langjährige Mittel der Kiesentnahmen entspricht also

etwa der Geschiebefracht unterhalb der Loisachmündung. Während diese vor 1923 mit $76\,000\text{ m}^3$ pro Jahr angegeben wird, waren es im Mittel der Jahre 1925/60 nur noch $52\,000\text{ m}^3$. Nach Einstau des Sylvensteinsees und der Staustufe Tölz verringerte sich die Gesamtsumme weiter auf etwa $30\,000\text{ m}^3$. Diese Restmenge wird ausschließlich aus dem Flußabschnitt zwischen Tölzer und Ickinger Wehr gedeckt, so daß die dort befindlichen Kiesmengen allmählich ausgeräumt werden.

Eine besondere Rolle spielen in diesem Zusammenhang die Hochwasser. Durch den Sylvensteinspeicher wurden, wie bereits erwähnt, die Hochwasser-Spitzenabflüsse im Mittel um $300\text{ m}^3/\text{s}$ reduziert. Damit nahm die Überflutungshäufigkeit höher gelegener Terrassen bzw. Kiesflächen stark ab, so daß sie nach und nach mit einer Vegetationsdecke überzogen und auf diese Weise befestigt wurden. Selbst extreme Hochwasser, wie das Ereignis von 1965, dem eine 500 jährige Wiederkehr zuzuordnen ist, können diese Entwicklung zwar vorübergehend aufhalten, jedoch nicht rückgängig machen. Die Fixierung eines Teiles der Kiesflächen verringerte zusätzlich die verfügbare Geschiebemenge und zwang den Fluß, sich zunehmend auf einzelne Hauptarme zu konzentrieren, während zahlreiche der vielfach gewundenen Nebenarme verlandeten. Infolge des Geschiebemangels wurden während einzelner Hochwasser immer wieder die Ufer durch Seitenerosion angegriffen. Zum Schutz der Siedlungen und der Auenwälder wurden daher stellenweise Ufersicherungen angelegt, die den Flußlauf zusätzlich eingeengt haben.

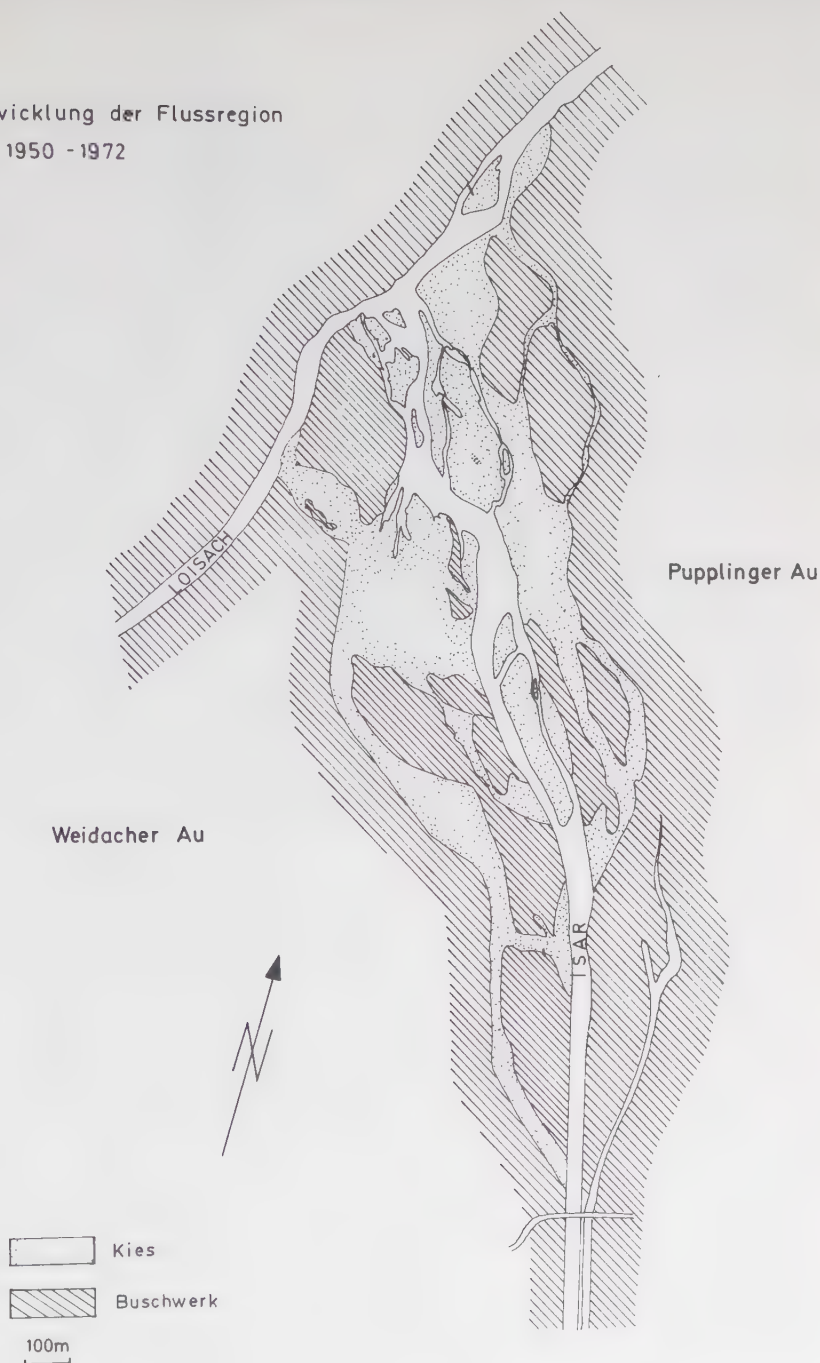
Wie sehr die Hochwasser gerade in der regulierten Strecke die Sohleintiefung gefördert haben, zeigt sich wieder an der Abbildung 8b: Bis zum Bau des Sylvensteinspeichers folgen die auffälligen Minima in der Reihe der Jahres-Niedrigstwasserstände auf extreme Hochwasser: so 1909, 1914, 1920, 1926, 1940 und andeutungsweise 1954. Während dieser Hochwasser wurde die Sohle in der Regulierungsstrecke offenbar stark eingetieft, andererseits jedoch so viel Geschiebematerial dem

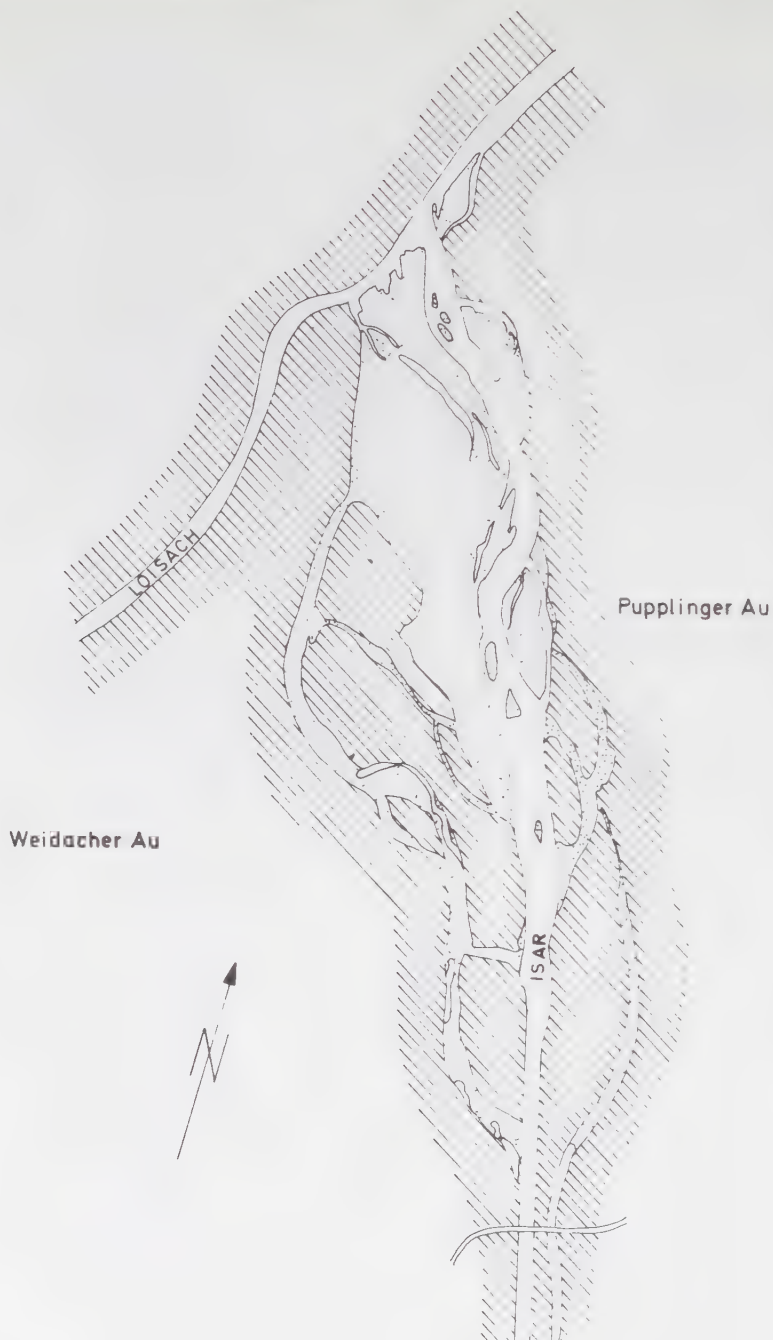
Fluß verfügbar gemacht, daß in der folgenden Zeit jeweils eine teilweise Auflandung stattfinden konnte. Auf diese Weise ergab sich etwa bis zum Jahre 1950 ein Wechsel von Eintiefungs- und Stabilisierungsphasen, letztere teils mit Auflandungstendenz. Nach 1950 jedoch wurden diese den Eintiefungsprozeß verzögernden Erholungsphasen unterdrückt, da der Nachschub von Geschiebematerial wegen des verringerten Abflusses im Isarbett stark abgenommen hatte. Inzwischen hat sich der Fluß oberhalb der Regulierungsstrecke schon stellenweise bis zur Grundmoräne eingetieft.

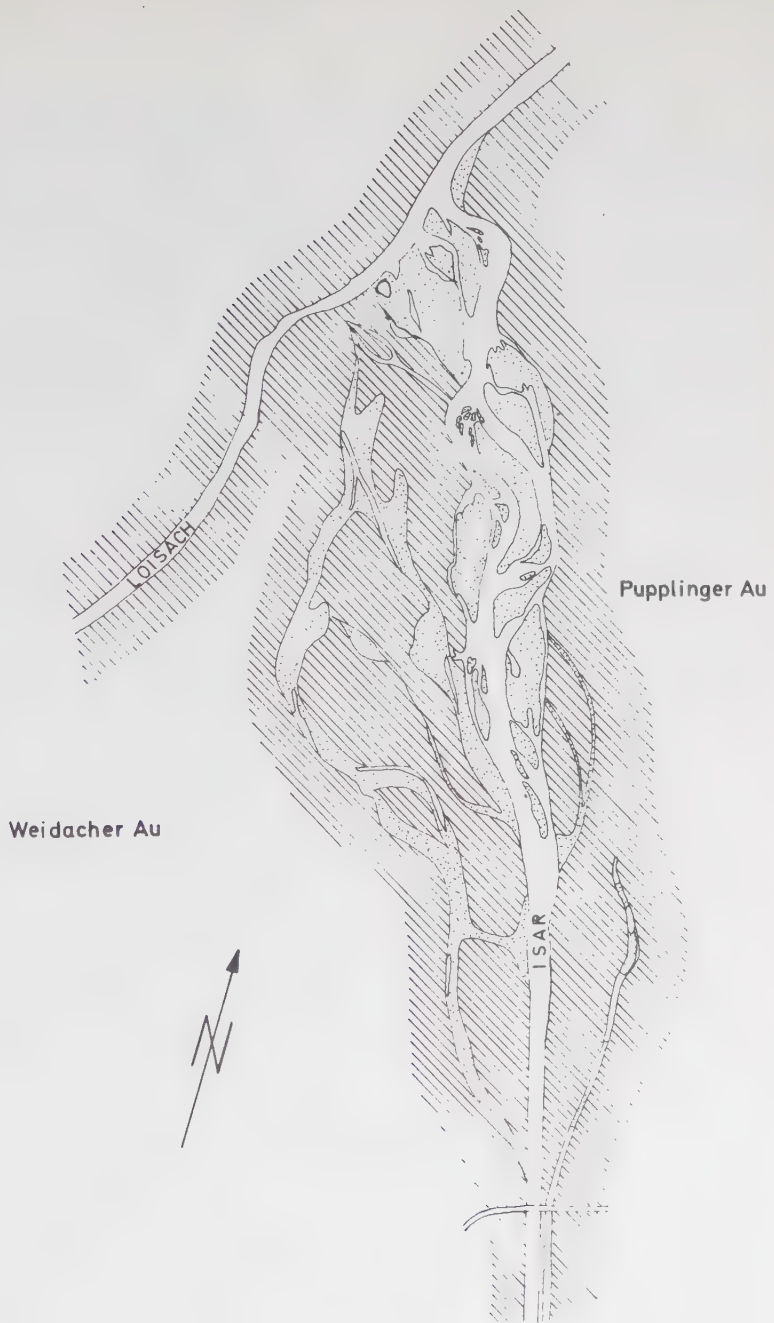
Die Entwicklung der Isar im Bereich der Pupplinger Au läßt sich sehr gut an Hand von Luftbildern verfolgen, die von verschiedenen Zeitpunkten vorliegen. Auf den Abbildungen 9a - 9d sind skizzenhafte Wiedergaben solcher Aufnahmen zusammengestellt, die die Situationen in den Jahren 1950, 1958, 1965 und 1971 zeigen. Auf den Darstellungen wurde nur zwischen offenen Kiesflächen, zusammenhängend bewachsenen Flächen und dem Verlauf der ständig durchflossenen Rinnen unterschieden. Die Skizzen bestätigen die oben geschilderten Veränderungstendenzen, die im folgenden nochmals kurz zusammengefaßt seien:

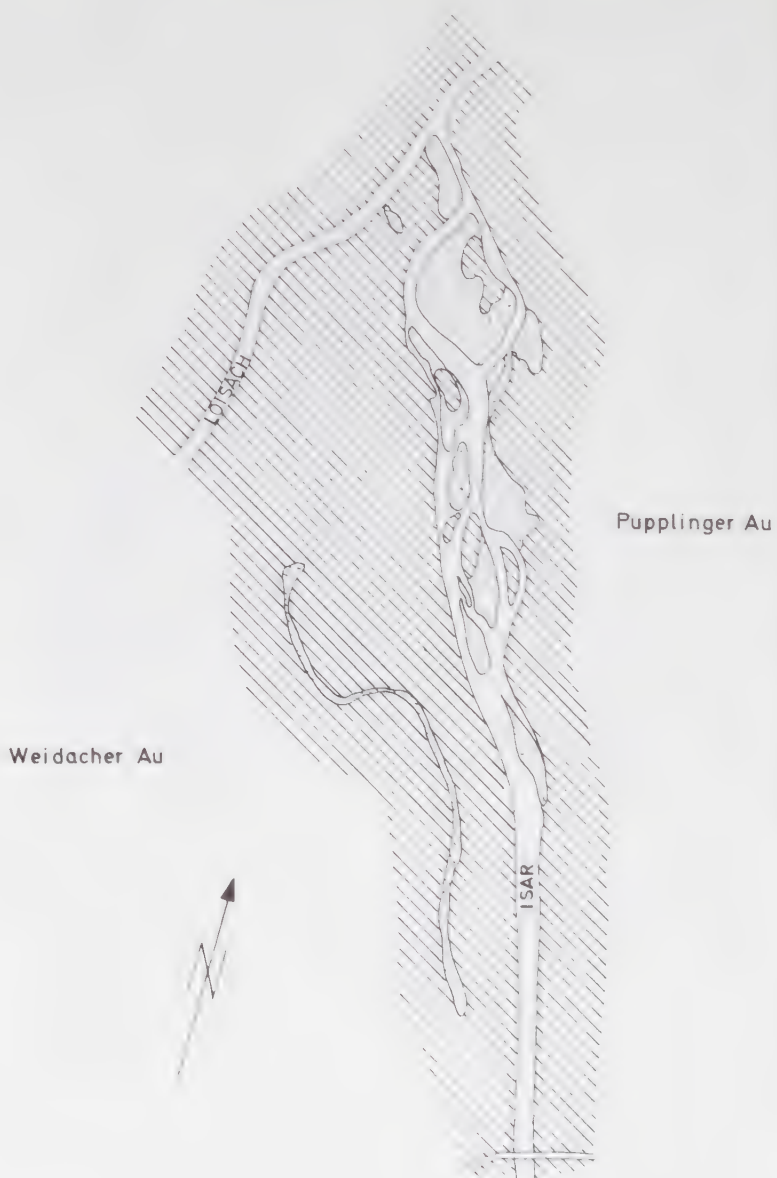
- Die Nebenarme und Altwässer verlanden; der Fluß konzentriert sich zunehmend auf ein Hauptgerinne. Lediglich die Abbildung 9c mit der Situation kurz nach dem extremen Hochwasser vom Sommer 1965 macht in der Reihenfolge eine Ausnahme.
- Die offenen Kiesflächen wachsen allmählich zu.
- Die Loisachmündung verlagert sich durch Erosion des rechten Isarufers immer mehr stromabwärts: von 1950 bis 1966 um 300 Meter. In den Jahren 1966/67 wurde dieser Entwicklung zum Schutz des Auwaldes durch Ufersicherungsmaßnahmen Einhalt geboten.

Entwicklung der Flussregion
von 1950 - 1972









3.3 DIE FESTSTOFF-FRACHT DER ISAR

3.3.1 A b g r e n z u n g z w i s c h e n S c h w e b - s t o f f u n d G e s c h i e b e

Die Gestaltungsvorgänge des Isarlaufes im Bereich der Pupp-
linger Au lassen sich, wie oben erläutert, generell auf das
Problem des Feststofftransportes zurückführen. In diesem
Fragenkreis sind alle anderen Einflußgrößen, wie die Abfluß-
verhältnisse oder die unmittelbaren Auswirkungen von Bau-
maßnahmen, indirekt enthalten.

Die Frage nach der Herkunft und der Zusammensetzung der
Feststoffe ist ebenso wie deren Transportmechanismus äußerst
komplex. Sie wird je nach den geologischen, hydrologischen
und hydraulischen Bedingungen - um nur einige zu nennen -
unterschiedlich zu beantworten sein.

Zunächst untergliedert man die Feststoffe nach ihrer Trans-
portart im Gewässer in Geschiebe und Schwebstoffe. (Anders
als in der Geologie wird in der Hydrologie unter Geschiebe
der an der Sohle der Flüsse transportierte Anteil der Fest-
stoff-Fracht verstanden.) Erstere bewegen sich rollend,
gleitend und springend an der Flußsohle, letztere werden schwe-
bend mitgeführt. Dazwischen gibt es stufenlose Übergänge,
wenn zum Beispiel einzelne Teilchen, durch Turbulenzwalzen
erfaßt, aufgewirbelt und zeitweilig schwebend mitgeführt
werden, bevor sie wieder zur Sohle zurücksinken. Ein objek-
tives Unterscheidungsmerkmal ist daher nur sehr schwer fest-
zulegen. Die meisten Autoren haben einen Grenzkorndurch-
messer angenommen oder aus Körnungsanalysen abgeleitet. Die
Vorschläge lagen zwischen 0,2 mm (BURZ /11/) und 1 mm
(HARTUNG /26/ u.a.). Häufig fand der von GALLO & ROTUNDI
/24/ angegebene Wert von 0,35 mm Bestätigung. EINSTEIN /17/
trennte den Übergangsbereich zwischen Schwebstoff und Ge-
schiebe als eigene Klasse ab und bezeichnete sie mit "Wash-
load". Daher liegt bei ihm der Korndurchmesser, der die Grenze
zum Schwebstoff markiert, mit 0,1 mm sehr niedrig.

Eine andere Gruppe von Autoren verzichtet von vornherein auf eine Festlegung der Grenze durch starre Korngrößenwerte und bezieht sich auf den Transportmechanismus der Feststoffteilchen. Dabei wird die Trennung zwischen Geschiebe und Schwebstoff abhängig gemacht von Wassertiefe und Energiegefälle (HAYAMI /27/), von der Verteilung von Turbulenz und Fließgeschwindigkeit im Profil (Modellversuche an der ETH Zürich, veröffentlicht in /16/), oder von den Trägheitskräften und der Schwerkraft (KRESSER /35/). Die letztgenannte Methode der Unterscheidung erscheint besonders interessant. Die Grenze zum schwebenden Transport wird dabei durch die FROUDE'sche Zahl ausgedrückt. Diese dimensionslose Größe dient - ähnlich wie die REYNOLDS-Zahl bei den Reibungskräften - zur Charakterisierung von Fließvorgängen, die in erster Linie von der Schwerkraft und den Trägheitskräften bestimmt werden. Sie findet also bei der Beschreibung von Strömungen in offenen Gerinnen Anwendung. In der hier benutzten Form wird die FROUDE-Zahl ausgedrückt als:

$$F_r = v_m^2 / g \cdot d_{gr}$$

F_r = FROUDE-Zahl
 v_m = mittl. Profilgeschwindigkeit
 g = Erdbeschleunigung
 d_{gr} = Grenzkorndurchmesser

KRESSER /35/ fand durch Eichung an verschiedenen Flüssen heraus, daß $F_r = 360$ als zutreffendes Kriterium für die Grenzziehung zwischen Schwebstoff und Geschiebe gewertet werden kann. Mit Hilfe dieser Beziehung wurde für die Isar bei Puppling unter Verwendung der Abflußmessungen der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde die Grenze zum Schwebstoff in Abhängigkeit von den Wasserständen aufgetragen (Abb. 10a, b), wobei jedoch statt der Profilgeschwindigkeit die Querschnittsgeschwindigkeit eingesetzt wurde. Aus Abb. 10a läßt sich in Abhängigkeit vom Wasserstand die Querschnittsgeschwindigkeit entnehmen und damit aus Abb. 10b der zugehörige Grenzkorndurchmesser. Dieser schwankt bei Wasserständen zwischen 0,9 und 1,7 m über Pegelnull - d.h. in dem durch die

Abflußmessungen erfaßten Bereich - zwischen 0,25 und 0,80 mm. Ausgeprägte Hochwasser sind allerdings in der kurzen Zeit seit Ausbau der Pegelanlage noch nicht erfaßt worden. Berücksichtigt man, daß die weitaus größten Geschiebe- und Schwebstoffmengen während der Hochwasser befördert werden - also bei hohem Grenzkorndurchmesser - so wäre im vorliegenden Fall als Näherungswert ein Durchmesser von 0,8 bis 1 mm zutreffend.

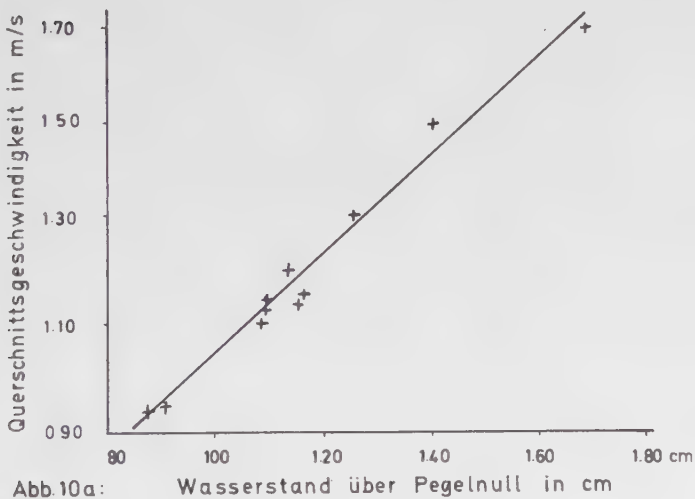


Abb.10a: Wasserstand über Pegelnul in cm

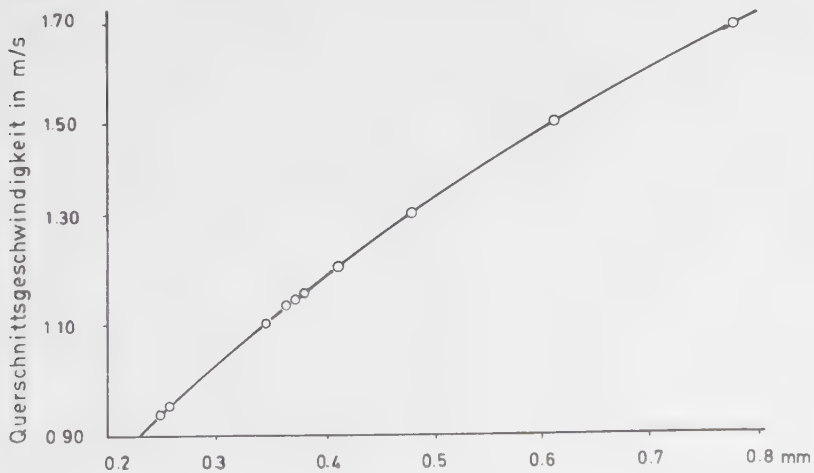


Abb.10b: Grenzkorndurchmesser in mm

3.3.2 G e s c h i e b e

Die Zusammensetzung des Geschiebes der Isar im Bereich der Pupplinger Au wurde 1962 und 1965 im Auftrage der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde untersucht (Gutachten Nr. 2516 - F, /8/). Die Ergebnisse sind in Tab. 4 wiedergegeben. Gleichzeitig vorgenommene Untersuchungen der Geschiebekörnung ergaben die in Tab. 5 zusammengefaßten Werte.

Tabelle 4: Petrographische Zusammensetzung des Geschiebes

Formation	Gestein	Anteil in %	
		1962	1965
Trias	Dolomit	20	49
	Kalkstein hell	27	31
	Kalkstein dunkel		
Kreide + Jura	Hornstein	44	14
	Radiolarit		
Jura	Fleckenkalk		
Kreide + Tertiär	Sandstein	8	5
Pleistozän	Kristallin	1	1

Tabelle 5: Körnungsparameter des Geschiebes

Jahr	dm	d ₉₀
	in mm	in mm
1934	18	41
1959	21	48
1965	22	60

In den Tabellenwerten spiegelt sich wiederum deutlich der Einfluß des Sylvensteinspeichers und des Kraftwerkes Tölz wider. Hinsichtlich der petrographischen Zusammen-

setzung ergibt sich folgendes Bild: Nach dem Einstau des Sylvensteinsees und der Errichtung des Tölzer Kraftwerkes nimmt der Anteil der überwiegend im oberen Teil des Einzugsgebietes der Isar anstehenden Gesteine ab, so daß sich das Verhältnis zu Gunsten der Kalk- und Dolomitgesteine verschoben hat. Die Körnungen haben sich stark vergrößert, was ebenfalls auf die künstlichen Unterbrechungen des Geschiebetransportweges zurückzuführen ist: Unterhalb der Sperren werden die Feinanteile zuerst ausgewaschen und damit die größeren Gerölle angereichert. Diese Vergrößerung des Sohlenmaterials (Sohlenpanzerung) wirkt sich hemmend auf die Tiefenerosion aus.

Eine eingehendere Berechnung des Geschiebe-Transportvermögens war nicht möglich, da sich zum einen mit den bisher vorliegenden Abflußmessungen noch keine zuverlässigen Dauerlinien ermitteln lassen, und da zum zweiten die Verhältnisse in diesem Gebiet so unausgeglichen sind, daß jede Berechnung mit den bekannten Geschiebetriebformeln wenig erfolgversprechend erscheint.

3.3.3 S c h w e b s t o f f

Das Problem des Schwebstofftransportes ist in seiner Gesamtheit nicht weniger komplex als Fragen des Geschiebehaushaltes. Während sich die Geschiebemenge, die durch einen geg. Querschnitt befördert wird, noch mit Hilfe hydraulischer Größen und Geschiebeparameter nach verschiedenen Formeln z.B. von MEYER-PETER /38/, SCHOCKLITSCH /48/, EINSTEIN /16/ oder BOGARDI /10/ wenigstens annähernd bestimmen läßt, gibt es bisher keine erfolgversprechenden Ansätze zur Berechnung von Schwebstoffmengen. Andererseits erfordern Schwebstoffmessungen einen im Vergleich zu Geschiebemessungen wesentlich geringeren Aufwand. Ist aber der Schwebstoffgehalt an einem Punkt des durchflossenen Querschnittes durch Messung bekannt und läßt sich die Konzentrationsverteilung über den ganzen

Querschnitt in Abhängigkeit der Fließbedingungen und der Körnungsparameter theoretisch ermitteln, so kann man die Schwebstoff-Frachten berechnen. Sobald auf diese Weise längere Meßreihen gesammelt worden sind, bietet sich die Möglichkeit, mit den Methoden der Statistik Zusammenhänge zwischen der Schwebstoff-Fracht und Einflußgrößen wie dem Abfluß oder Merkmalen des Einzugsgebietes zu untersuchen. Den Schwebeproblemen kommt mitunter gegenüber dem Geschiebe insofern mehr Bedeutung zu, als die Schwebstoffe in der Regel einen erheblich größeren Anteil an der gesamten Feststoff-Fracht ausmachen. Nach groben Schätzungen ist das Verhältnis 1:10 (HARTUNG /26/). Aus diesem Grunde ist den Fragen des Schwebstofftransportes in der vorliegenden Arbeit ein breiterer Raum gewidmet.

Im Untersuchungsgebiet finden sich Schwebstoffablagerungen aus der jüngeren, spät- und postglazialen Geschichte dieser Gegend in zweifacher Form: einmal als die mächtigen Seetonablagerungen des Wolfratshauser Sees, zum anderen als feinsandig-tonige Lagen in ehemaligen Flußarmen und Mulden der jüngsten Terrasse, die dort während der Überflutungen durch die Isarhochwasser sedimentiert wurden. Die Situation, unter der sich diese Ablagerungen bildeten, ist heute kaum noch rekonstruierbar. Die Sedimentation im Wolfratshauser See vollzog sich unter anderen klimatischen Verhältnissen als sie heute in diesem Raum bestehen: Die Gletschererosion setzte große Mengen von Feinmaterial frei, das als Gletschertrübe dem See zufloß und dort zur Ablagerung kam. Eine nach dem Gletscherrückzug zunächst dürftigere Vegetationsdecke schützte die umgebenden Moränen nur schwach vor dem Flächenabtrag durch abfließenden Niederschlag. Später, nach Verlandung des Sees, konnten die häufigeren und durch keine Speicher vorgeklärten Hochwasser der Isar viel mehr Schweb in den Flußauen zum Absatz bringen, als dies gegenwärtig der Fall ist. Heute spiegelt die Schwebstoff-Führung des Flusses ebenso wie der Geschiebehaushalt deutlich die Wirkungen der künstlichen Eingriffe in das Flußregime wider. Zur

näheren Untersuchung dieser Einflüsse mit dem Ziel einer quantitativen Aussage werden im folgenden ihre Auswirkungen auf die Ganglinien von Schwebstoffgehalt und Abfluß sowie auf die Beziehungen zwischen den beiden Variablen untersucht. Als Beispiel bietet sich der Einstau des Sylvensteinsees im Jahre 1959/60 an. Im folgenden werden erst die beiden Größen Abfluß und Schwebstoffgehalt und dann die Auswirkungen des Sylvensteinspeichers behandelt. Bei der Gewinnung der Schwebstoffdaten, die diesen Betrachtungen zugrunde liegen, wurde die Konzentrationsverteilung des Schwebstoffgehaltes über den Querschnitt weitgehend vernachlässigt. Daher wird auch auf diese Frage näher eingegangen.

Für das vorliegende Kapitel mußte jedoch der engere Rahmen des Arbeitsgebietes überschritten werden, da dort keine Schwebstoffmeßstelle betrieben wird. Die nächsten Meßstellen befinden sich unterhalb des Sylvensteinsees und in München-Bogenhausen. Es ist jedoch anzunehmen, daß die Schwebstoffverhältnisse bei München nur wenig von denen in der Isar unmittelbar unterhalb der Loisacheinmündung abweichen, da einerseits auf der Zwischenstrecke keine nennenswerten Zuflüsse einmünden und andererseits der Anteil des im Gerinneabschnitt anfallenden Geschiebeschwebes nur gering sein kann: Ein großer Teil des Isarwassers fließt dort in betonierten Kraftwerkskanälen. Zuverlässige Daten liegen für die Meßstelle München und Sylvenstein seit 1950 bzw. 1952 vor. Zum Vergleich wurde die Meßstelle Plattling mit betrachtet, die jedoch erst seit 1960 beobachtet wird.

3.3.3.1 Der Einfluß auf den Schwebstoffgehalt und die Beziehung zum Abfluß

Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen dem Schwebstoffgehalt und dem Abfluß sind von mehreren Autoren für zahlreiche Flüsse bereits durchgeführt worden. Als Beispiele seien die Arbeiten von BOGARDI /9/, der einige Flüsse im

Karpatenbecken bearbeitete, und MÜLLER & FÖRSTNER /39/ mit Untersuchungen über den Alpenrhein erwähnt. Die genannten Autoren ermittelten den Schwebstoffgehalt bzw. Schwebstofftrieb als Exponentialfunktionen des Abflusses. BOGARDI setzte überdies die Parameter dieser Gleichungen in Beziehung zu physikalischen Gegebenheiten der zugehörigen Einzugsgebiete. Amerikanische Autoren wie FLAXMAN /22/ ermittelten den Schwebstoffgehalt von vornherein als Funktion mehrerer unabhängiger Variabler. In jüngster Zeit wurden Versuche unternommen, mit Hilfe von Schwebstoff- und Abflußmeßreihen mathematische Modelle zur Prognose von Schwebstoff-Frachten abzuleiten (RODRIGUEZ-ITURBE /43/).

Zunächst sollen die Ausgangsvariablen selbst genauer betrachtet werden.

A b f l u ß : Die Abflußdaten werden indirekt aus den Wasserständen gewonnen. Dies erfolgt über Abflußschlüsselkurven, d.h. empirischen Funktionen zwischen Wasserstand und Abfluß. Die Abflußschlüssel werden durch Abflußmessungen gewonnen, bei denen zu verschiedenen Wasserständen mittels hydraulischer Flügel die durch den Pegelquerschnitt fließenden Wassermengen gemessen werden. Der Flügel besteht aus einem Propeller, dessen Umdrehungszahl auf die Fließgeschwindigkeit geeicht ist. Bei den Abflußmessungen werden an möglichst vielen über den durchflossenen Querschnitt verteilten Punkten die Geschwindigkeiten gemessen und durch Interpolation und Integration die durchfließenden Wassermengen in m^3/s ermittelt.

Abflußmessungen erfordern einen erheblichen Zeit- und Geräteaufwand. Sie werden deshalb nur relativ selten durchgeführt, z.B. bei gut betreuten Meßstellen in Bayern 10 - 20 Male im Jahr. Die Flußgerinne sind andererseits ständigen Veränderungen wie Sohleneintiefungen und -auflandungen, Verkräutung und Vereisung unterworfen, so daß die Punktwolke im Abfluß-Wasserstands-Diagramm je nach Meßstelle verschieden breit gestreut ist. Zur Ermittlung der Abflüsse im Zeitraum zwischen zwei Abflußmessungen werden unterschiedliche

Interpolationsverfahren angewandt.

Der umständliche Weg zur Gewinnung der Abflußdaten birgt unvermeidliche Fehlerquellen. Sie lassen sich in zwei Gruppen aufteilen: zum einen die Fehler, die bei Abflußmessungen entstehen und zum anderen die Fehler, die von der Unkenntnis der Abflußverhältnisse zwischen den Messungen herrühren.

Für die erste Gruppe ist neben der Zuverlässigkeit der Geräte und der Genauigkeit der Messung ganz besonders der Einfluß der Turbulenz maßgebend. In einer turbulenten Strömung sind sowohl die Fließrichtung als auch die Geschwindigkeit ständigen Änderungen unterworfen, deren Ausmaß in der Nähe der Wandungen am größten ist. Gerade in diesem Bereich treten als zusätzliche Fehlerquellen gegebenenfalls noch Verkräutung oder Profilunebenheiten hinzu. Der Flügel mißt daher nicht die wahre Geschwindigkeit an einer Stelle, sondern nur einen Zufalls- wert. Weitere Fehler ergeben sich bei der Interpolation zur Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit. Alles in allem beträgt der Gesamtfehler im Normalfall 3 - 7%. Unter ungünstigen Umständen oder bei extremen Wasserständen kann er jedoch erheblich größer werden. Der Einfluß der verschiedenen Fehlerquellen bei Abflußmessungen wurde von DICKINSON /14/ eingehend untersucht.

Die zweite Gruppe von Fehlern rührt daher, daß in den Intervallen zwischen den Abflußmessungen keine Anhaltspunkte über Art und Umfang von Veränderungen im Abflußverhalten vorhanden sind. Jede Umgestaltung des durchflossenen Profils, der Schwebstoffbelastung oder der Temperatur kann die Wasserstands-Abfluß-Beziehung empfindlich beeinflussen. Bei der Ermittlung von Abflußdaten zwischen zwei Abflußmessungen versucht man, nach Erfahrungsgrundsätzen zu interpolieren. Deuten z.B. die durch die Abflußmessungen belegten Veränderungen auf eine Sohleneintiefung hin, so wird man den Übergang während einer Anschwellung der Abflußganglinie vornehmen, gemäß der Erfahrung, daß Eintiefungen während der Anschwellungen, Auf- landungen jedoch während der abfallenden Äste von Hochwasser-

ganglinien auftreten. Lassen sich die Veränderungen auf Verkrautungseinfluß zurückführen, so wird beim Ausgleich die Wachstumsperiode der Wasserpflanzen berücksichtigt.

Alle diese Interpolationsversuche führen zu Fehlern, die besonders bei Pegeln mit großer Streuung der Abflußmessungen um die Schlüsselkurve erhebliche Beträge annehmen können. Die Isarpegel Sylvenstein und München mit ihren ausgebauten Flußprofilen zeigen eine sehr enge Streubreite der Meßpunkte und liefern daher verhältnismäßig zuverlässige Werte. Lediglich das Hochwasser im Sommer 1965, bei dem längere Zeit erhebliche Wassermengen aus dem Sylvensteinspeicher abgelassen wurden, hatte am Pegel Sylvenstein eine so starke Sohleneintiefung zur Folge, daß eine neue Schlüsselkurve erstellt werden mußte.

S c h w e b s t o f f: Zur Ermittlung der Schwebstoff-Frachten der Flüsse werden von den gewässerkundlichen Dienststellen eigene Meßstationen unterhalten. Dort werden in Intervallen, die sich nach dem Verhalten der Wasserstandsganglinien richten, Wasserproben aus dem Stromstrich entnommen und gefiltert. Auf diese Weise erhält man den S c h w e b s t o f f g e h a l t der Probe in mg/l. Der nächste Schritt - die Bestimmung des m i t t l e r e n S c h w e b s t o f f g e h a l t e s im Querschnitt - ist sehr viel schwieriger, da die Konzentrationsverteilung im Querschnitt ungleichmäßig und schwer meßbar ist. Man behilft sich damit, daß man den Schwebstoffgehalt der Einzelprobe unverändert oder mit einem geschätzten Korrekturfaktor versehen als mittleren Gehalt übernimmt. Durch Multiplikation mit dem Abfluß ergibt sich aus dem Schwebstoffgehalt der S c h w e b s t o f f t r i e b in kg/s als die pro Sekunde durch den Meßquerschnitt tretende Gesamtmenge. Aus dem Schwebstofftrieb errechnen sich die S c h w e b s t o f f - F r a c h t e n durch Integration über die Zeit. In den Jahrbüchern der gewässerkundlichen Anstalten werden im allgemeinen Jahres-Frachten veröffentlicht.

HARTUNG /26/ untergliedert die Schwebstoffe nach ihrer Herkunft in "Geschiebeschweb" und "Flächenschweb". Der erstere entsteht durch Sohl- und Seitenerosion der Gerinne sowie durch den Geschiebeabtrieb, letzterer durch das Lösen und Abspülen feinkörnigen Materials von den Flächen des Einzugsgebietes. Ebenfalls als Schwebstoffe werden organische Bestandteile wie z.B. Pollen mitgeführt.

Die Schwebstoffzufuhr entlang der Flüsse erfolgt sehr unregelmäßig: Uferanbrüche, Hangrutsche, Einmündungen schwebstoffreicher Nebenflüsse oder Grenzen zwischen unterschiedlich ergiebigen geologischen Formationen erscheinen für die Schwebstoffgehalte als Zufallseinflüsse.

Neben der räumlichen Verteilung ist die Schwebstoffkonzentration extremen zeitlichen Schwankungen unterworfen. Diese folgen einerseits der jährlichen Periode des Klimas, andererseits kurzfristigen Oszillationen im Gefolge der Niederschlags-tätigkeit. Die langfristigen Schwankungen werden bestimmt durch die Vegetationsperiode - die voll entwickelte Vegetation hemmt den Flächenabtrag, während mangelnder Pflanzenschutz, besonders die Brache der Äcker, die Abschwemmung fördern - sowie durch Frost- und Schneeperioden, in denen potentiell Schwebstoffmaterial im Einzugsgebiet zurückgehalten wird. Die kurzfristigen Schwankungen können enorme Ausmaße annehmen. Im Gefolge von Niederschlägen großer Intensität auftretende Schwebstoffgehalte können das Hundertfache der unmittelbar zuvor gemessenen Menge erreichen. Solche sprunghaften Konzentrationserhöhungen haben verschiedene Ursachen: So löst z.B. der Aufschlags-Impuls großer Regentropfen, wie sie bei sommerlichen Starkregen auftreten, durch das Zerschlagen der Bodenstruktur viel Feinmaterial, das dann als Flächenschweb in die Flüsse gelangt. Während der Anschwellungen von Hochwassern ist die Gerinneerosion besonders stark. Häufig wird schon in den ersten Intervallen eines längeren Niederschlagsereignisses das in der vorausgegangenen Trockenperiode angereicherte Feinmaterial abgeschwemmt, so daß der

Schwebstoffgehalt bereits wieder abnimmt, wenn die Wasserstände noch steigen. In diesen Fällen eilt das Schwebstoffkonzentrationsmaximum dem Wasserstandsmaximum voraus.

Die an einem Pegel gemessenen Schwebstoff-Frachten sind außer von den natürlichen Verhältnissen auch von den anthropogenen Einflüssen im Einzugsgebiet sowie besonders den unmittelbaren wasserbaulichen Eingriffen im Gewässernetz selbst abhängig. Die Schwebstoff-erzeugung ist je nach Bodennutzung sehr verschieden, kann aber überall dort, wo in größerem Ausmaß Erdbewegungen vorgenommen werden, stark ansteigen. Dagegen wirken Flußregulierungen und ähnliche wasserbauliche Maßnahmen der Gerinneerosion als Schwebstoffquelle entgegen. Am stärksten macht sich die Klärwirkung von Speichern oder Speicherketten bemerkbar.

Nach den bisherigen Ausführungen über die Schwebstoffe ist zu erwarten, daß die Angaben für die Schwebstoff-Frachten nur als grobe Näherungswerte aufgefaßt werden können. Die beiden Hauptursachen hierfür liegen zum einen in der Schwierigkeit, den mittleren Schwebstoffgehalt über den Querschnitt zu ermitteln, zum anderen darin, daß keine kontinuierlich aufgezeichnete Information vorhanden ist, wie etwa die Wasserstandsganglinie bei der Abflußermittlung. Statt dessen ist der Schwebstoffgehalt nur zu gewissen Zeiten bekannt, wobei die Intervalle vom Betreuer der Meßstelle selbst gewählt werden. Dieser ist lediglich angehalten, bei Hochwässern besonders intensiv zu messen und möglichst das Konzentrationsmaximum zu erfassen.

3.3.3.2 Der Schwebstofftransport

Für quantitative Untersuchungen der großräumigen Akkumulations- und Erosionsvorgänge interessieren in erster Linie die Schwebstoff-Jahresfrachten. Bereits im Abschnitt 3.3.3.1 waren die Schwierigkeiten, die bei der Ermittlung von

Schwebstoffgehalt, Schwebstofftrieb und Schwebstoff-Fracht auftreten erläutert worden, Ihre Auswirkungen auf die Genauigkeit waren ebenfalls erwähnt worden. Der vorliegende Abschnitt enthält Betrachtungen darüber, wie diese Genauigkeit erhöht werden kann. Dabei wird die Bestimmung der Frachten aus dem Schwebstofftrieb ausgeklammert, da hier die Frage der Zuverlässigkeit der Daten in erster Linie vom Meßwesen abhängt. Bei der Bestimmung des Schwebstofftriebes aus dem Gehalt dagegen hängt die Genauigkeit von der Kenntnis der Schwebstoffkonzentrationsverteilung über den Fließquerschnitt ab. Auf dieses Problem wird im folgenden näher eingegangen.

Vereinfachend sei dabei angenommen, daß das Verhältnis von Breite zu Tiefe in den natürlichen Flußläufen so groß ist, daß von den Ufern her keine Einflüsse auf die Konzentrationsverteilung einwirken und die Untersuchung daher auf das vertikale Profil beschränkt werden kann. Vereinfachend sei weiterhin angenommen, daß sich unter den jeweils gegebenen Fließbedingungen wie Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit und Turbulenzentwicklung eine stationäre, d.h. zeitlich unveränderliche, Konzentrationsverteilung eingestellt habe. Diese Stationarität gilt zwar nur im statistischen Mittel über die Zeit, doch ist diese Vereinfachung derzeit die einzige Möglichkeit, um zu einfachen und praktisch verwendbaren Formeln zu gelangen. Die Erfassung des sehr komplexen und weithin ungeklärten, instationären Prozesses der turbulenten Diffusion suspendierter Partikel in einer Flüssigkeit übersteigt den Rahmen dieser Arbeit. Der folgende Abschnitt stützt sich daher auf ältere Vorstellungen stationärer Modelle, die sich auch bei anderen Fragen, wie z.B. der Geschwindigkeitsverteilung im Fließquerschnitt praktisch bewährt haben.

Die stationäre Konzentrationsverteilung der Schwebstoffe in einem durchflossenen Querbewegung wird durch das Gleichgewicht zwischen der Sinkbewegung der Partikel infolge der Gravitation und der turbulenten Querbewegung des schwebstoffbeladenen Wassers aufrecht erhalten.

Diese Gleichgewichtsbedingung wird in Anlehnung an die Formel für den Austausch in turbulenter Strömung von v. KARMANN /30/ folgendermaßen formuliert:

$$C_y \cdot W + v_y' \cdot l \cdot \frac{dC_y}{dy} = 0 \quad (1)$$

Darin bedeutet:

- C_y = Konzentration in der Höhe y über der Sohle (meßbar)
- W = Sinkgeschwindigkeit der betrachteten Kornfraktion (bestimmbar über das STOKES'sche Gesetz)
- l = Mischungsweg
- v_y' = Austauschgeschwindigkeit

Unbekannt in dieser Gleichung sind v_y' und l . Beide Größen können jedoch aufgrund der von KALINSKE /29/ und anderen Autoren experimentell bestätigte Analogie zwischen dem Sediment- und dem Impulsaustausch in einer turbulenten Strömung abgeleitet werden. Man kann damit v_y' und l aus den bekannten Gleichungen für den Impulsaustausch ermitteln und in die Gleichung (1) einsetzen. Zum besseren Verständnis dieser Zusammenhänge wird hier kurz auf die Verhältnisse in einer turbulenten Strömung eingegangen.

Die Laminarströmung läßt sich mit dem Ansatz von NEWTON

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad \begin{array}{l} \text{mit } \mu = \text{Viskosität} \\ \tau = \text{Schubspannung} \\ u = \text{Geschwindigkeit} \\ y = \text{Wand- bzw. Sohlabstand} \end{array}$$

vollständig erfassen. Dieser Ansatz versagt jedoch bei der turbulenten Strömung. Im Gegensatz zum laminaren Fall, bei dem die Stromfäden als durchgehend parallel-laufend angenommen werden, treten bei turbulenter Strömung Querbewegungen auf, die einen Impulsaustausch benachbarter Strömungsbereiche bewirken. Zur quantitativen Abschätzung dieses Impulses muß

die Quer- oder Austauschgeschwindigkeit wenigstens näherungsweise bestimmt werden. Als erster hat PRANDTL /41/ dazu ein konkretes Gedankenmodell entwickelt: Er kommt zu dem Ausdruck:

$$v_y' = l \cdot \frac{du}{dy} \quad (2)$$

Versuche haben gezeigt, daß der Mischungsweg l proportional der Entfernung von der Wand bzw. Sohle ist, d.h. $l = \lambda \cdot y$. NIKURADSE /40/ ermittelte für den Proportionalitätsfaktor λ einen Wert von 0,4. Zur Ableitung des Impulsaustausches, der gleich dem Produkt aus Masse und Quergeschwindigkeit ist, betrachte man eine Einheitsfläche, die in Fließrichtung in der Strömung aufgespannt ist. Der Austauschimpuls pro Flächeneinheit und Sekunde ist dann gleich

$$i_a = \frac{m \cdot v_y'}{F \cdot T} = \frac{\rho \cdot V \cdot v_y'}{F \cdot T} = \rho \cdot v_y'^2 = \rho \cdot \left(l \cdot \frac{du}{dy} \right)^2$$

i_a = Austauschimpuls pro Flächeneinheit und Sekunde

m = Masse

F = Querschnittsfläche

T = Zeit

ρ = Dichte

V = Volumen

Ein Impuls pro Zeit entspricht aber einer Kraft, in diesem Fall einer Spannung, da wir uns auf die Flächeneinheit bezogen haben. Man bezeichnet diese Spannung als "scheinbare Schubspannung der Turbulenz":

$$\tau = \rho \cdot \left(\lambda \cdot y \cdot \frac{du}{dy} \right)^2 \quad (3)$$

v.KARMAN /30/ kommt auf einem anderen Weg zu dem gleichen Ergebnis.

Zu diesem Ausdruck wäre noch die laminare Schubspannung zu addieren; nach ROUSE /45/ nimmt jedoch der Einfluß von μ bei höheren REYNOLDS-Zahlen sehr schnell ab, so daß der laminare

Anteil der Gesamtschubspannung vernachlässigt werden kann.

In einem Flüssigkeitsquerschnitt ist die Geschwindigkeit an einem Punkt noch zeitlichen Schwankungen unterworfen. Der Übergang auf den zeitlichen Mittelwert wird durch Umbenennung von U in v gekennzeichnet. Damit ist nur noch die Verteilung der Schubspannung über den Querschnitt unbekannt. In der folgenden Ableitung wird von einer dreiecksförmigen Verteilung ausgegangen:

$$\tau = \tau_0 \cdot \frac{t - y}{t} \quad \begin{array}{l} \tau_0 = \text{Wandschubspannung} \\ t = \text{Wassertiefe} \end{array}$$

Damit ergibt sich aus Gleichung (3):

$$\tau = \tau_0 \cdot \frac{t - y}{t} = \rho \cdot (\chi \cdot y \cdot \frac{dv}{dy})^2$$

und daraus:

$$\frac{dv}{dy} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{t - y}{t}} \cdot \frac{1}{\chi \cdot y}$$

Der Ausdruck $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ hat die Dimension einer Geschwindigkeit. Er wird als Schubspannungsgeschwindigkeit bezeichnet und mit v_{χ} abgekürzt. Sie läßt sich überführen in den Ausdruck

$$v_{\chi} = \sqrt{g \cdot t \cdot i_e} \quad \begin{array}{l} \text{mit } g = \text{Erdbeschleunigung} \\ i_e = \text{Energiegefälle} \end{array}$$

Mit (2) erhält man damit für die Austauschgeschwindigkeit:

$$v_y' = 1 \cdot \frac{dv}{dy} = v_{\chi} \cdot \sqrt{\frac{t - y}{t}} \quad (4)$$

Setzt man (4) in die Ausgangsgleichung (1) ein, so erhält man:

$$c_y \cdot w + v_{\chi} \cdot \sqrt{\frac{t - y}{t}} \cdot \chi \cdot y \cdot \frac{dc_y}{dy} = 0 \quad (5)$$

Mit $\lambda = 0,4$ ergibt sich nach Umformung:

$$\frac{dC_y}{dy} = - \frac{w}{0,4 \cdot v_H} \cdot \frac{1}{y} \cdot \sqrt{\frac{t}{t-y}} \cdot C_y$$

Die Integration dieser Gleichung ergibt:

$$\frac{C_y}{C_a} = \left\{ \frac{a}{y} \cdot \left[\frac{\sqrt{t} + \sqrt{t-y}}{\sqrt{t} + \sqrt{t-a}} \right]^2 \right\}^z \quad \text{mit} \quad z = \frac{w}{0,4 \cdot v_H} \quad (6)$$

Um ein bestimmtes Integral zu erhalten, wird dabei von einer vorgegebenen Höhe a über der Sohle aus integriert. Im allgemeinen wird a zu $0,05 t$ angenommen. Man erhält dann für einen beliebigen Sohlabstand y nicht die Konzentration selbst, sondern das Verhältnis C_y/C_a . Die Formel ist in ihrer Anwendung sehr einfach, da der Klammerausdruck bei vorgegebenem a für jedes y konstant ist und allein in z alle veränderlichen Angaben wie Wassertiefe, Wasserspiegelgefälle und Korngröße bzw. Fallgeschwindigkeit der Körner eingehen. Für letztere wird man in der praktischen Anwendung hinreichend genaue Ergebnisse mit dem mittleren Korndurchmesser einer Schwebstoffprobe erzielen. Es seien hier nochmals die einschränkenden Bedingungen zusammengefaßt, unter denen die Formel gültig ist:

Die Diffusivität ist ihrem lokalen Betrag nach für den Massen- und Impulsaustausch gleich.

Die mittlere Fallgeschwindigkeit der Schwebstoffteilchen relativ zur Umgebung ist in turbulent bewegtem Wasser die gleiche wie in ruhendem Wasser.

Die Konzentrationsverteilung im Querschnitt befindet sich im stationären Gleichgewicht.

Die Gleichung (6) ist in ihrer Struktur sehr ähnlich der von ROUSE /45/ unter etwas anderen Voraussetzungen abgeleiteten Formel:

$$\frac{c_y}{c_a} = \left[\frac{a}{y} \cdot \frac{t - y}{t - a} \right]^z$$

ROUSE ging von einer dreiecksförmigen Schubspannungsverteilung aus, bestimmte v_y' aber nach dem Gesetz der logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung nach v.KARMANN /30/, bei dem τ über den Querschnitt konstant und gleich der Wandschubspannung τ_0 ist. Zu dem gleichen Ergebnis wie ROUSE gelangt man nach der oben beschriebenen Ableitung, wenn man für τ eine parabelförmige Verteilung annimmt:

$$\tau = \tau_0 \cdot \left(\frac{t - y}{t} \right)^2$$

Wie die Abb. 11b, c zeigt, unterscheiden sich die beiden Schubspannungsprofile nicht wesentlich von einander. Die ungleichmäßigere Verteilung zusammen mit einem geringeren Betrag der Schubspannung in Oberflächennähe im Fall c läßt darauf schließen, daß sich unter dieser Annahme für den Wasserspiegelbereich geringere Konzentrationen ergeben, was ein Vergleich der beiden Formeln, wie er in Abb. 13 dargestellt ist, tatsächlich bestätigt. Danach ergeben sich für die Wasserspiegelnähe die größten Abweichungen. Die Abbildung zeigt weiterhin, daß die Differenzen mit wachsendem z , also z.B. für zunehmende Korngrößen, immer geringer werden. Im ganzen führt die Gleichung (6) zu höheren Konzentrationen und damit auch zu einem höheren Schwebstofftrieb.

Um die beiden Formelnvergleichen zu können, war zunächst geplant, in dem kanalisierten Streckenabschnitt der Isar an der Marienbrücke bei Wolfratshausen in vertikalen Profilen wiederholt die Konzentrationen zu messen. Auf Grund der sehr stark streuenden Ergebnisse einer allerdings unter ungünstigen Bedingungen durchgeführten Probemessung, bei der in der Mitte des Flusses aus einem Profil 18 Proben entnommen worden waren (Abb. 12), sowie wegen des großen Geräteaufwandes, mit dem derartige Messungen verbunden sind, wurde auf weitere Versuche in dieser Richtung verzichtet.

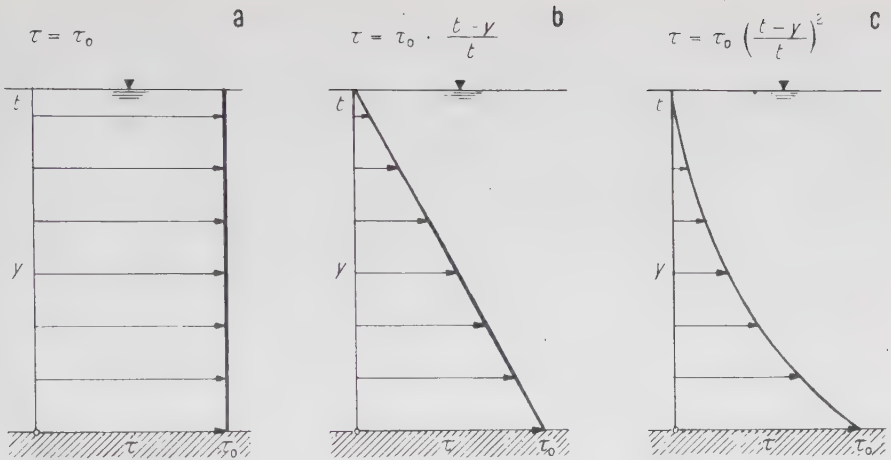


Abb. 11 Schubspannungs-Verteilungen im Profil

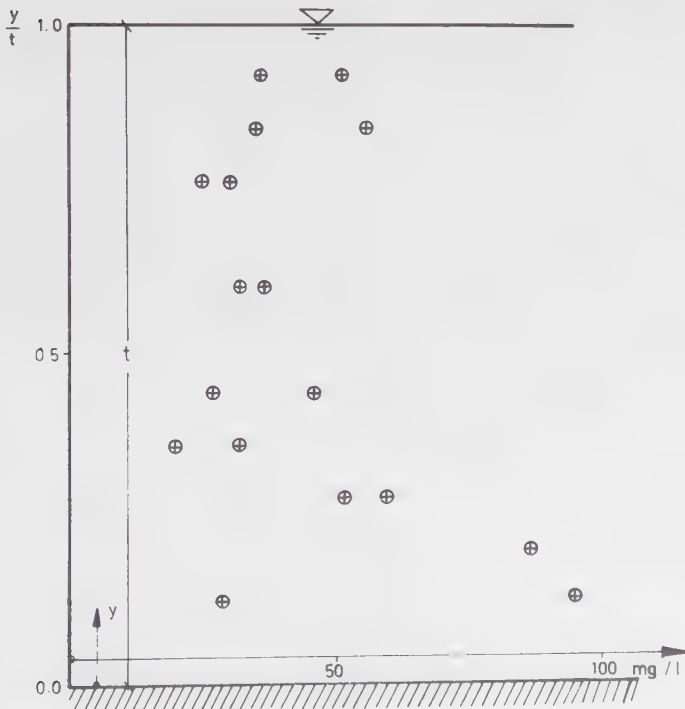


Abb.12: Schwebstoffmessungen
in der Isar bei Puppling

Für Vergleiche dieser Art stehen jedoch die umfangreichen Modellversuchsergebnisse von VANONI /54/ zur Verfügung. Der Autor hat in einem Rechtecksgerinne Messungen der Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilungen bei verschiedenen Schwebstoffgehalten und unterschiedlichen Kornzusammensetzungen vorgenommen, wobei er außerdem das Gefälle i_w und die Wassertiefe t variierte. Es ergab sich dabei, daß die experimentell ermittelten Konzentrationsverteilungen bei größerem Exponenten z mit den nach ROUSE /45/ berechneten übereinstimmten, daß sie bei kleinerem z bzw. bei kleineren Körnungen jedoch stark von diesen abwichen. Bei Verwendung der Funktion von ROUSE mußte der Exponent z im letzteren Fall zum Teil erheblich ermäßigt werden, um eine optimale Annäherung an die Versuchsergebnisse zu erhalten. Die gleiche Beobachtung wurde durch verschiedene Autoren gemacht. Bereits 1942 hat ANDERSON /4/ erneut darauf hingewiesen. Auch die Auswertung von Profilmessungen in natürlichen Flußquerschnitten, wie sie von COLBY und HEMBREE /12/ vom Niobrara River und von COLBY /13/ vom Mississippi beschrieben wurden, führten zu der gleichen Feststellung.

Für die vergleichende Untersuchung wurden nun aus den von VANONI veröffentlichten Versuchen sieben Fälle mit unterschiedlichen Versuchsbedingungen ausgewählt. Unberücksichtigt blieben nur die Fälle mit $z \geq 1$, da einerseits die Übereinstimmungen der experimentellen mit den nach ROUSE berechneten Werten sehr gut war und andererseits in diesem Bereich die Abweichung zwischen den Verteilungen nach ROUSE und der Gleichung (6) nur unbedeutend sind.

In den Abb. 14a-g sind die verschiedenen Verteilungskurven der Konzentration nach ROUSE, nach VANONI (experimentell) und nach Gleichung (6) einander gegenübergestellt. Es erweist sich, daß die nach Gleichung (6) berechneten durchweg besser mit den experimentell ermittelten übereinstimmen. In der Mehrzahl der Fälle stellen diese Kurven sogar eine optimale Annäherung an die durch die Versuche ermittelten dar.

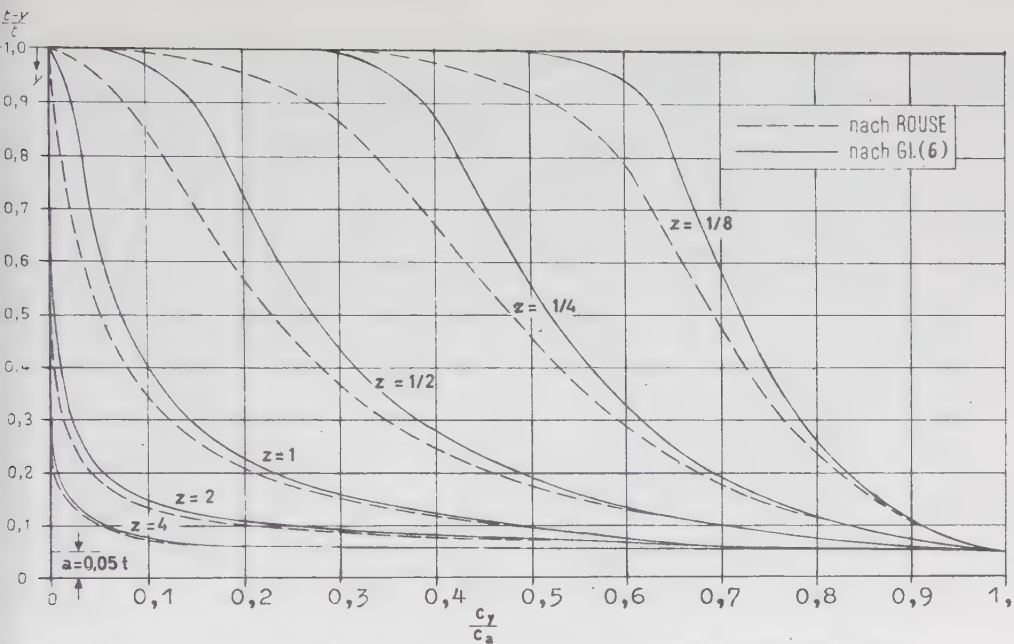


Abb. 13 Vergleich der Konzentrationsverteilungen nach ROUSE und nach Gl. (6) für verschiedene Exponenten

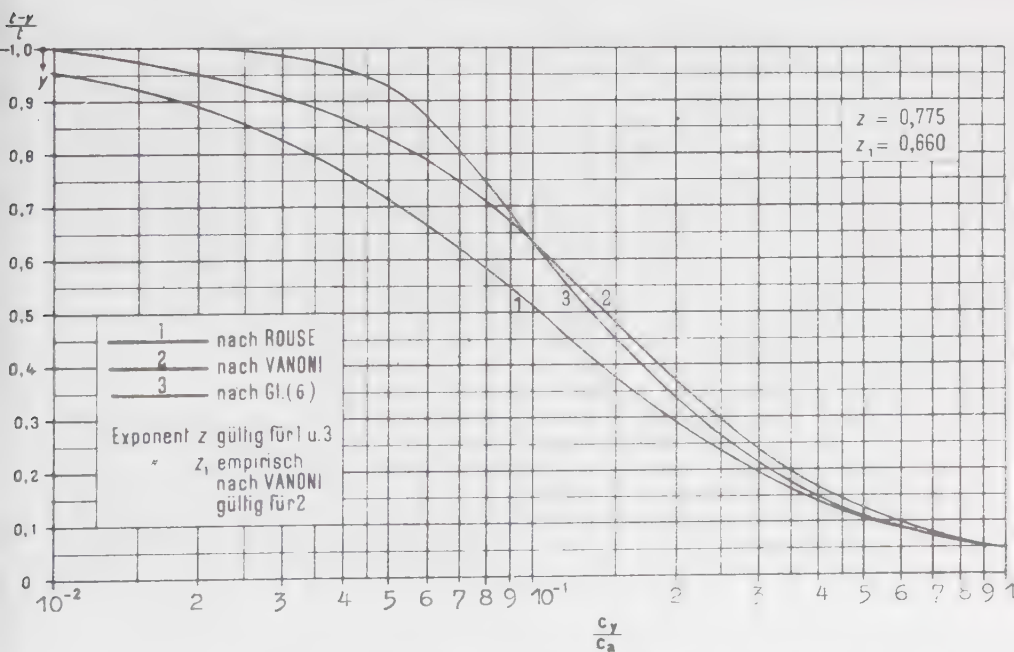


Abb. 14a Schwebstoff-Konzentrations-Verteilung im vertikalen Profil

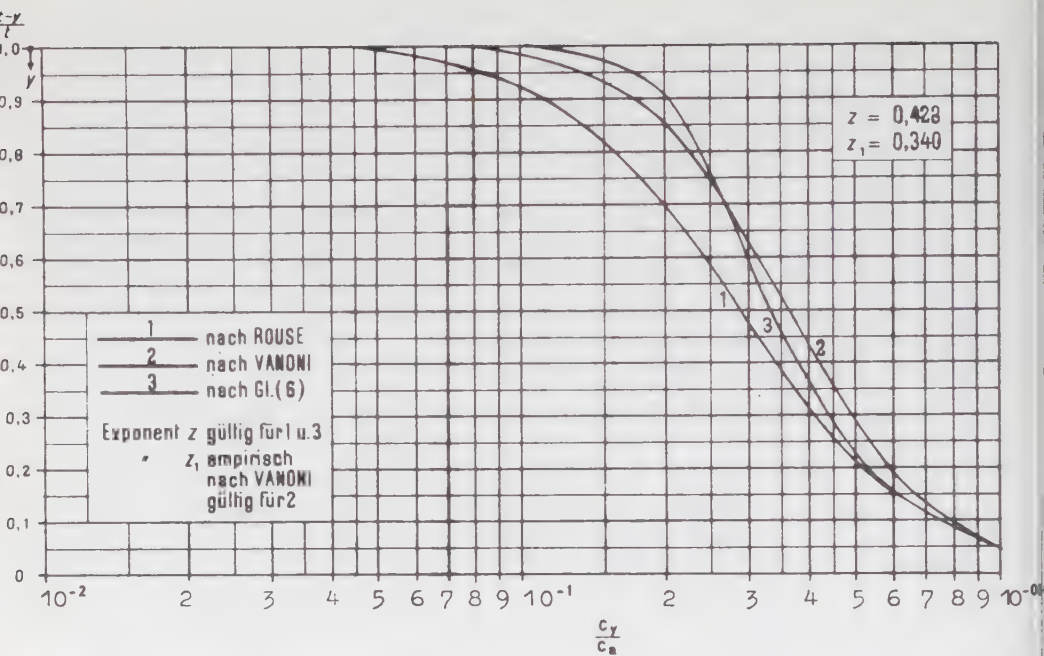


Abb. 14b Schwebstoff-Konzentrations-Verteilung im vertikalen Profil

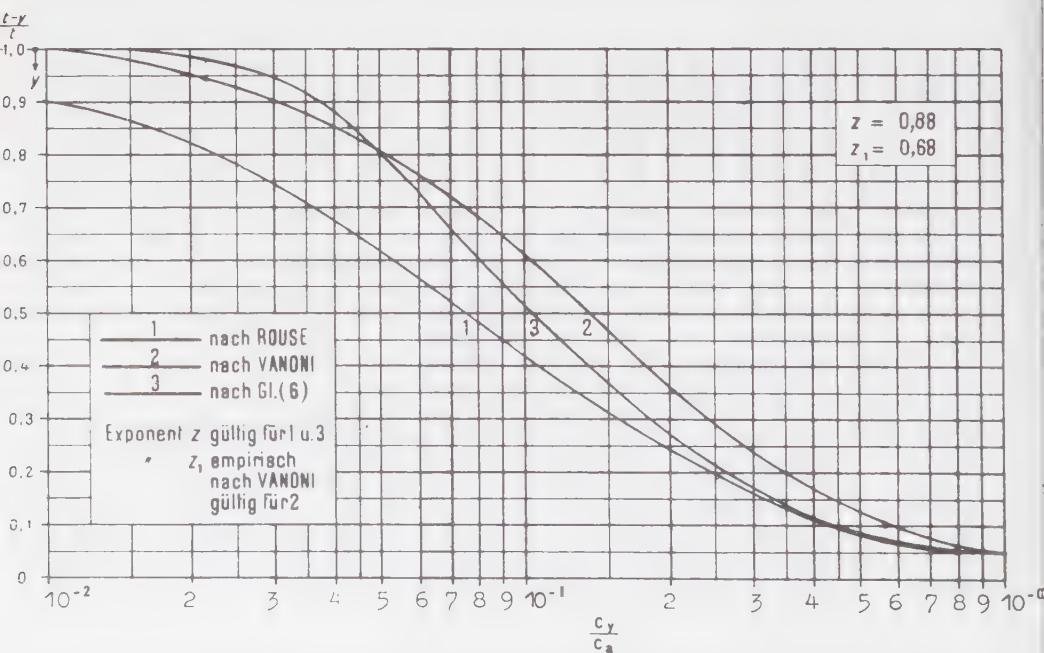


Abb. 14c Schwebstoff-Konzentrations-Verteilung im vertikalen Profil

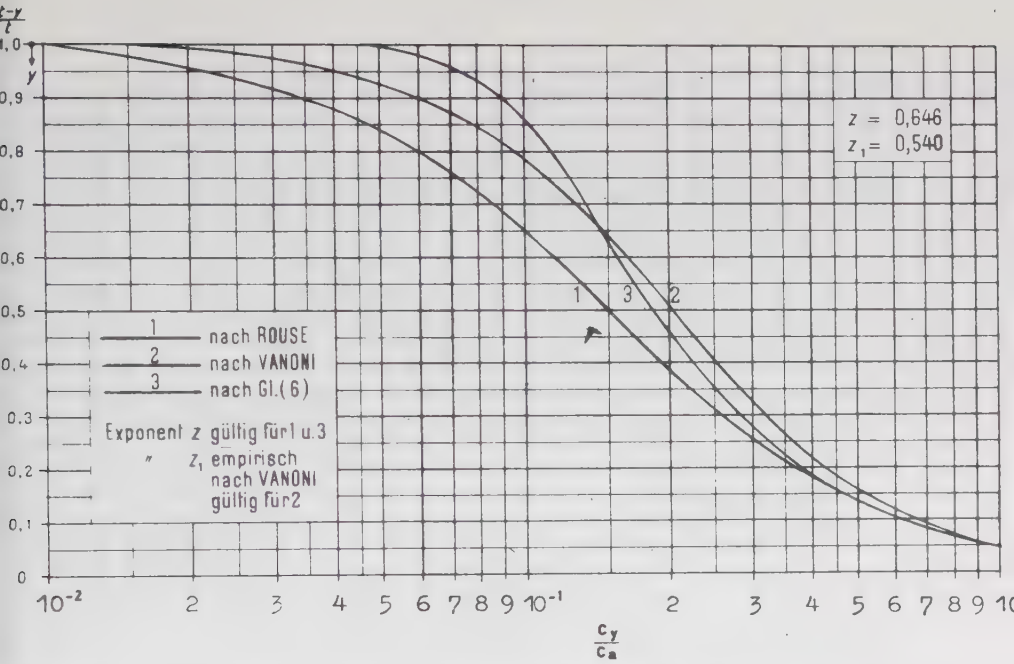


Abb. 14d Schwebstoff-Konzentrations-Verteilung im vertikalen Profil

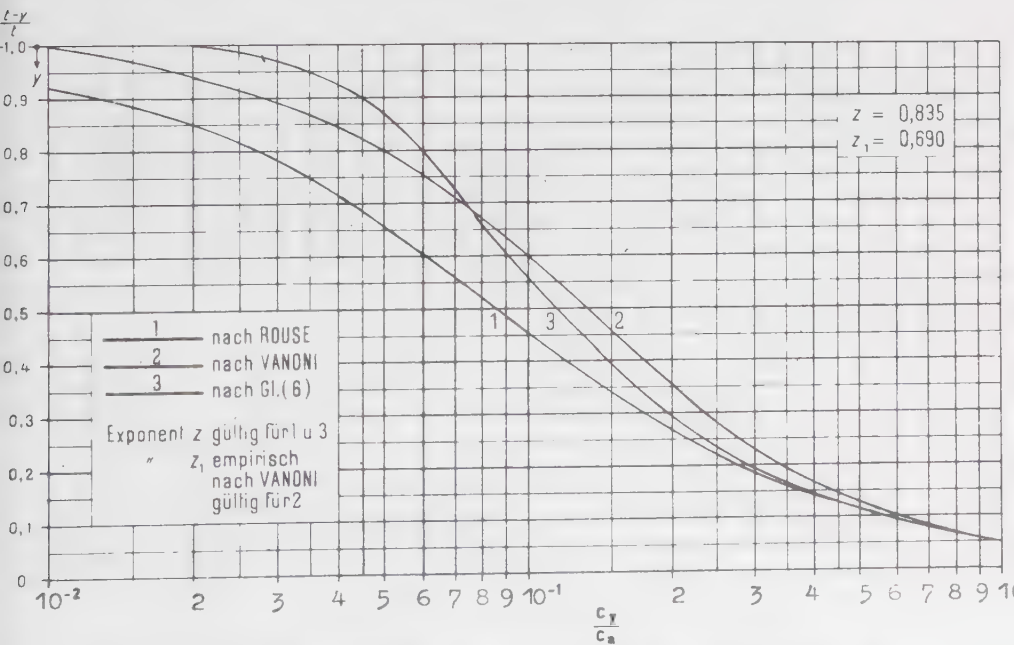


Abb. 14e Schwebstoff-Konzentrations-Verteilung im vertikalen Profil

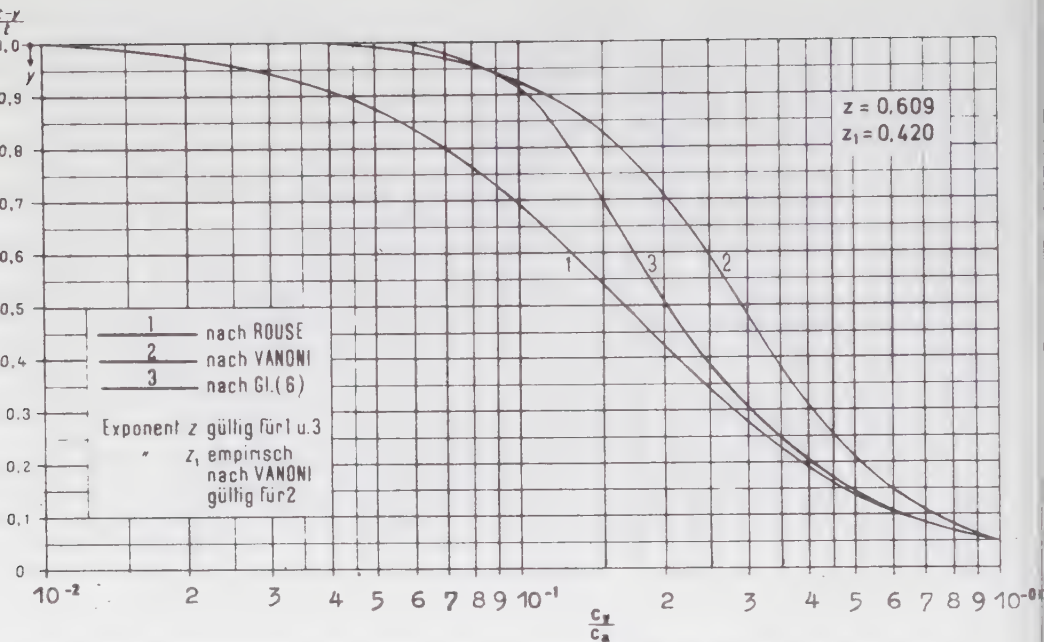


Abb. 14f Schwebstoff-Konzentrations-Verteilung im vertikalen Profil

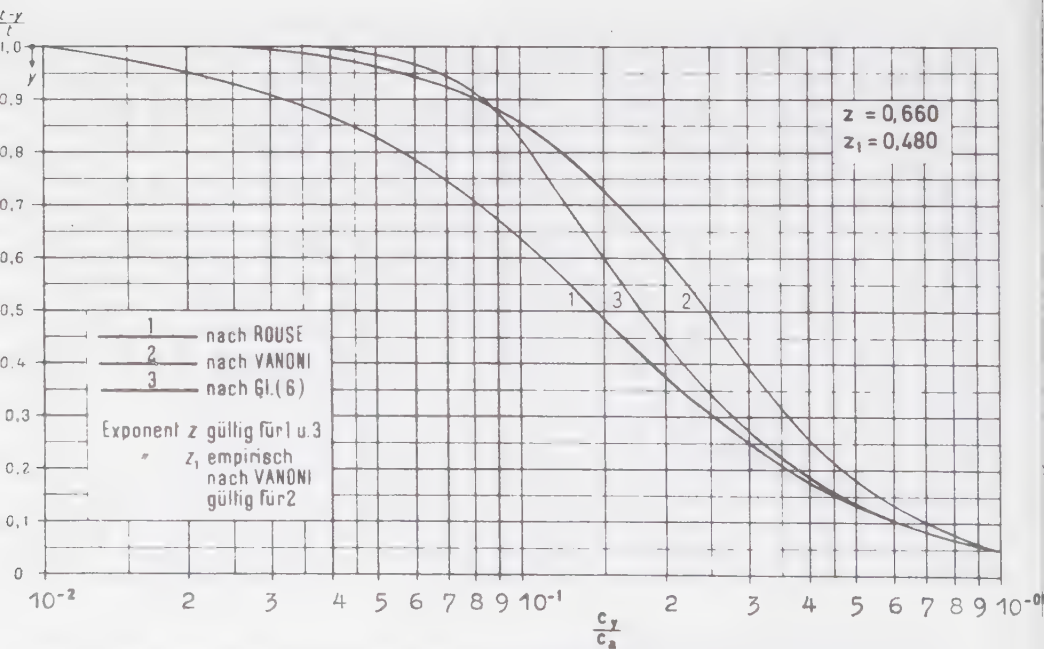


Abb. 14g Schwebstoff-Konzentrations-Verteilung im vertikalen Profil

Bei diesen Vergleichen kann noch nichts über den Funktionstyp ausgesagt werden, da VANONI bei seinen Versuchen von der von ROUSE gegebenen Formel ausgegangen ist und nur den Exponenten so gewählt hat, daß seine Meßwerte optimal angenähert wurden. In der Praxis hat sich jedoch mehrfach gezeigt, daß die Gleichung von ROUSE in der Nähe des Wasserspiegels zu geringe Konzentrationen ergibt. Hierin dürfte auch der Grund zu suchen sein, warum diese Formel bisher im Schwebstoffmeßwesen - bei dem meist oberflächennahe Proben entnommen werden - kaum Beachtung gefunden hat. Die Verwendung der Gleichung (6) wird vielleicht in dieser Hinsicht bessere Möglichkeiten eröffnen.

3.3.3.3 Die Schwankungen der Ganglinien von Schwebstoffgehalt und Abfluß, sowie deren Beziehung zu einander

In diesem Abschnitt werden die Schwankungen von Schwebstoffgehalt und Abfluß sowie deren Zusammenhang in der Zeit vor und nach dem Sylvensteinspeicher-Bau statistisch untersucht und die Ergebnisse einander gegenübergestellt. Bei dieser Untersuchung werden nicht die einzelnen Meßwerte betrachtet, sondern die Monatsmittel. Auf diese Weise werden die Fehlerinflüsse durch Mittelung abgeschwächt, und man erhält eine Reihe diskreter, zeitlich gleichabständiger Werte. Alle Daten wurden außerdem logarithmiert, um eine zu ungleichmäßige Verteilung der Werte durch starke Konzentration in den mittleren bis niedrigen Bereichen zu vermeiden. Im folgenden wird mit x der Abfluß und mit y der Schwebstoffgehalt bezeichnet.

Als Maß für die Schwankungen der Zeitreihen dient die Varianz. Die wahre Varianz ist jedoch hier wie im folgenden nicht bekannt. Es wird daher mit der sogenannten "empirischen" Varianz gerechnet. Sie wird, wie in der Praxis üblich, als Varianz ohne Zusatz bezeichnet. und nach folgender Formel berechnet:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2;$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

σ_x^2, σ_y^2 = Varianz

N = Anzahl der Werte

x_i, y_i = Monatswerte

$\bar{x}, \bar{y}$ = Mittel der Monatswerte

Die Schwankungen der Ausgangsreihen sind durch eine mehr oder minder deutliche Jahresperiode überlagert. Sie werden deshalb durch ein eigenes Symbol V gesondert gekennzeichnet, jedoch nach der gleichen Formel berechnet, wie die Varianz σ^2 .

Die Zeitreihen der Variablen Schwebstoffgehalt und Abfluß setzen sich zusammen aus einem Anteil, der rechnerisch erfaßbaren Gesetzmäßigkeiten folgt (deterministischer Anteil), und einem scheinbar rein zufälligen Teil. Es wird nun versucht, die rechnerisch erfaßbaren Anteile soweit als möglich zu bestimmen und nacheinander aus der Zeitreihe zu entfernen. Nach jedem Schritt wird die Varianz der durch die jeweils ausgeführte Rechnung veränderten Reihe ermittelt. Die Differenz zwischen der Varianz der Ausgangsreihe V und der Varianz der veränderten Reihe, ausgedrückt als Prozentanteil von V, wird als "Streuungsgewinn" G bezeichnet. Ziel der Betrachtung ist ein Vergleich der Streuungsgewinne und der rechnerisch bewirkten Veränderungen der Reihen.

Im einzelnen werden folgende Varianzanteile untersucht:

- a) J a h r e s g a n g : Sowohl der Schwebstoffgehalt wie der Abfluß zeigen einen Jahresgang, bei dem jeweils auf hohe Frühjahrs- und Sommerwerte niedrigere Beträge im

Herbst und Winter folgen. Diese Periode wurde aus den Reihen entfernt, indem die Abweichungen der Werte von den Mittelwerten der einzelnen Monate berechnet wurden. So werden z.B. in der neuen Reihe die Februarwerte durch ihre Abweichungen vom Mittel aus allen Februarwerten repräsentiert. Auf diese Weise wird der Jahresgang entfernt und der Gesamtmittelwert auf Null reduziert. Als Beispiel wurden für die Meßstelle München auf Abb. 15 sowohl für die Zeit vor als auch nach dem Speichereinstau diejenigen Anteile aufgetragen, die von den Reihen der Schwebstoffgehalte abgezogen wurden.

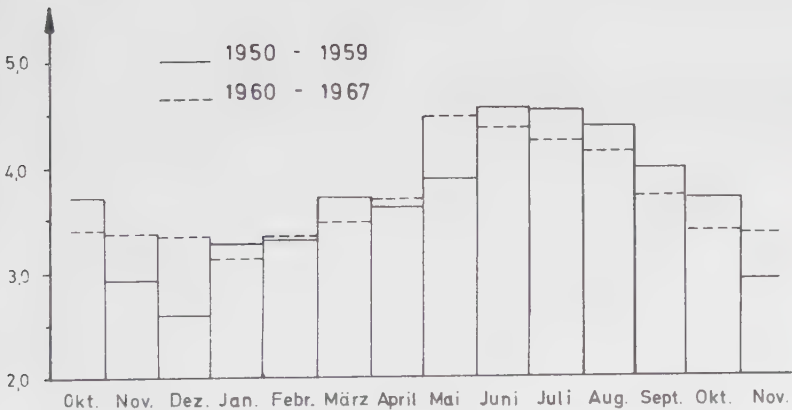


Abb. 15 mittlere monatliche Schwebstoffgehalte
Meßstelle München

- b) **E r h a l t u n g s n e i g u n g** (Autokorrelation):
Diese Erscheinung zeigt sich bei beiden Variablen und bedeutet, daß häufig auf hohe Werte nochmals hohe bzw. auf niedrige wiederum niedrige folgen. Die Ursache kann z.B. darin liegen, daß oft Schön- bzw. Schlechtwetterperioden über zwei oder mehr Monate anhalten.

Die Erhaltungsneigung lässt sich durch die Autokorrelationsfunktion nachweisen. Diese besteht aus den Korrelationskoeffizienten, gebildet aus den Werten einer Zeitreihe mit zurückliegenden Werten der gleichen Reihe: Schreibt man die gleiche Reihe in zwei Zeilen untereinander an und verschiebt diese Zeilen schrittweise gegeneinander, so errechnen sich die Autokorrelationskoeffizienten aus den Wertepaaren der jeweils untereinander stehenden Daten. Der Koeffizient für die Verschiebung null ist 1. Im Autokorrelogramm sind die Koeffizienten gegen die zugehörigen Verschiebungsbeiträge aufgetragen. Wenn nun eine Zeitreihe keine Erhaltungsneigung aufweist, dürfen die Autokorrelationskoeffizienten der gegeneinander verschobenen Reihen nicht "signifikant" von Null verschieden sein.

Signifikanz bedeutet folgendes: Die Autokorrelationskoeffizienten wurden aus einer nur wenige Jahre umfassenden Reihe gewonnen und sind daher nicht als wahre Werte, sondern nur als mehr oder weniger von diesen abweichende Schätzwerte zu betrachten. Hat man einen Koeffizienten geschätzt, so liegt der zugehörige wahre Wert in einem statistisch definierbaren umgebenden Bereich. Beinhaltet dieser von den sog. Signifikanzgrenzen eingeschlossene Bereich den vorgegebenen Wert - im vorliegenden Fall den Wert Null - , so ist die Abweichung nicht signifikant. Die Signifikanzgrenzen wurden hier nach ANDERSON /3/ berechnet. Auf die Signifikanzteste wird weiter unten eingegangen.

Die Erhaltungsneigung kann durch eine Autoregression entfernt werden, d.h. durch eine Gleichung, welche die Abhängigkeit der Werte einer Reihe mit zurückliegenden Werten der gleichen Reihe in Ansatz bringt, z.B.:

$$x_i = a_1 \cdot x_{i-1} + a_2 \cdot x_{i-2} + \dots + a_n \cdot x_{i-n} + \xi_i$$

Hier ist x_i von n zurückliegenden Gliedern abhängig. Die Restglieder ξ_i bilden die neue Reihe, die keine Erhaltungs-

neigung mehr aufweisen darf. Die Frage, wieviele zurückliegende Werte den Wert x_i mitbestimmen, wird durch Probieren ermittelt. Im Fall der Zeitreihe von Schwebstoffgehalt und Abfluß enthielten die Restglieder bereits nach einer einfachen Autoregression keine Erhaltungsneigung mehr. Die Gleichungen lauten:

$$x_i' = a \cdot x_{i-1}' + \xi_i \quad \text{bzw.} \quad y_i' = b \cdot y_{i-1}' + \eta_i$$

Die Striche bedeuten, daß die Werte dieser Reihen im Gegensatz zu den Ausgangsdaten keinen Jahresgang mehr enthalten. Die Parameter a und b der Autoregressionsgleichungen werden mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (MARSAL /37/). Die neuen Reihen werden gebildet durch:

$$\xi_i = x_i - a \cdot x_{i-1} \quad \text{bzw.} \quad \eta_i = y_i - b \cdot y_{i-1}$$

Auf Abb. 16 sind als Beispiel die Autokorrelogramme der x_i' und ξ_i sowie der y_i' und η_i für den Pegel München im Zeitraum von 1950 bis 1959 dargestellt.

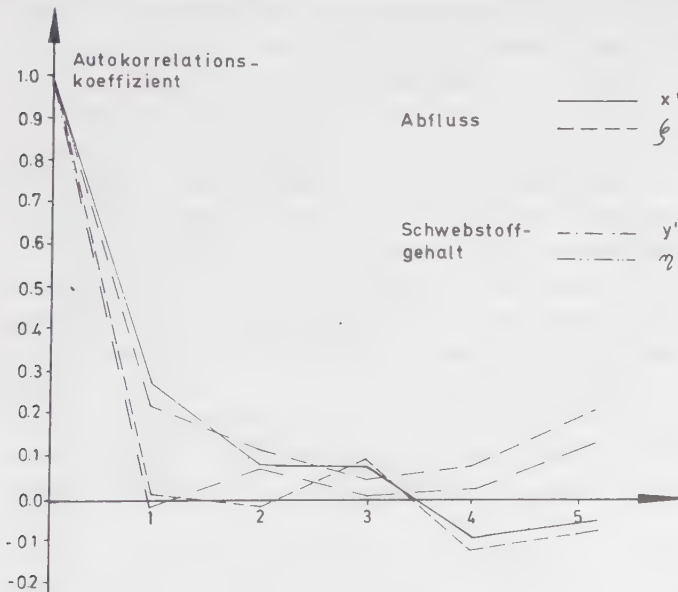


Abb. 16: Autokorrelogramm der Variablen x' und y' vor und nach der Autoregression

- c) Die Beziehung zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluß :
In diesem letzten Schritt wird untersucht, wieviel der verbleibenden Varianz der η -Werte aus einer Beziehung mit den ξ -Werten erklärt werden kann, bzw. wie eng der Zusammenhang zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluß ist. Als Bezugsgleichung wird eine lineare Einfachregression gewählt:

$$\eta_i = c \cdot \xi_i + \gamma_i$$

Die γ_i -Werte bilden hierbei eine nach allen durchgeführten Rechenschritten verbleibende Zeitreihe von Zufallswerten. Ihre Varianz wird als "Restvarianz" bezeichnet und dem Maß V für die Schwankungen der Ausgangsreihe gegenübergestellt. In der angegebenen Gleichung ist η die abhängige Variable und ξ der Regressor. Dabei wird vereinfachend angenommen, daß die ξ -Werte nicht fehlerbehaftete, sondern "wahre" Werte sind, d.h. daß die Varianz der Fehler in den ξ -Werten gleich Null ist. Dies erscheint gerechtfertigt, da die Fehler in den Abflußmeßwerten wesentlich geringer sind als beim Schwebstoffgehalt.

Bei der Untersuchung der η - ξ -Beziehung werden die Parameter der Regressionsfunktion an verschiedenen Pegeln und unter verschiedenen Bedingungen verglichen. Dazu ist es notwendig, daß die geschätzten Parameter nicht nur für die betreffende Stichprobe Gültigkeit besitzen, sondern sich gleichzeitig den Parametern der Grundgesamtheit annähern. Das ist der Fall, wenn die ξ - und η -Werte normal verteilt sind, was durch die logarithmische Transformation annähernd erreicht wurde, und zusätzlich folgende Bedingungen erfüllen (HALD /25/):

- α) Für gegebene ξ -Werte sollen die η -Werte normal verteilt sein.
- β) Der Mittelwert von η für gegebenes ξ soll eine lineare Funktion von x sein.
- γ) Die Standardabweichung von η soll für jeden ξ -Wert die gleiche sein.
- δ) Die Beobachtungen sollen keine Erhaltungseigenschaft besitzen.

Im Fall der Schwebstoff-Abflußbeziehungen besteht von vornherein keine Kenntnis darüber, ob diese Bedingungen erfüllt sind. Vor jeder Rechnung muß daher ihre Gültigkeit durch eine Reihe von statistischen Testen überprüft werden. Statistische Tests dienen zur Nachprüfung von Hypothesen, d.h. von Annahmen über unbekannte Verteilungsgesetze oder statistische Parameter. Dazu benötigt man geeignete Stichproben- oder Schätzfunktionen, d.h. Funktionen der unbekannten Größe, die von der Stichprobe und deren Umfang abhängen und deren Verteilung unter der Bedingung, daß die Hypothese zutrifft, bekannt ist. Der Wertebereich der Stichprobenfunktion wird in zwei Bereiche eingeteilt, einen Indifferenzbereich und einen Ablehnungsbereich. Die Grenze zwischen diesen Bereichen legt man willkürlich durch die sog. Signifikanzzahl fest, im allgemeinen bei 1%, 5% oder 10%. Liegt nun der aufgrund der Stichprobe berechnete Wert der Stichprobenfunktion im Ablehnungsbereich, so wird die Hypothese verworfen. Liegt der Wert im Indifferenzbereich, so ist ihre Gültigkeit damit nicht bewiesen, es kann aber festgestellt werden, daß aufgrund der Stichprobe kein Anlaß zu ihrer Ablehnung besteht. In den folgenden Fällen wurde als Signifikanzzahl stets 5 % gewählt.

Die erste Bedingung (α) ist recht schwierig zu testen, da zu jedem ξ - bzw. $\Delta\xi$ -Intervall eine große Anzahl von η -Werten vorhanden sein müßte, um einen Anpassungstest durchführen

zu können. Hier wurde daher nur getestet, ob die Abweichungen aller η -Werte von der Ausgleichsgeraden normal verteilt sind. Falls diese Hypothese nicht widerlegt werden konnte, wurde angenommen, daß dann auch für jedes einzelne ξ die η -Werte normal verteilt sind, vorausgesetzt, die übrigen Bedingungen sind ebenfalls erfüllt. Außerdem wurde getestet, ob die γ_1 entlang der Ausgleichsgeraden normal verteilt waren. Als Anpassungstest diente der Chi-Quadrat-Test.

Die zweite Bedingung (β) - Linearität der Beziehung zwischen beiden Größen - wurde in jedem Fall durch einen Linearitätstest geprüft (KREYSZIG /35/).

Zur Untersuchung der dritten Bedingung (γ) wurde ein Test angewandt, bei welchem für verschiedene Intervalle auf der x-Achse die Varianzen der zugehörigen y-Werte daraufhin geprüft werden, ob sie signifikant von einer mittleren Varianz abweichen (HALD /25/).

Die letzte Bedingung (δ) ist erfüllt, da die Erhaltungseigenschaft vorher aus der Reihe entfernt wurde.

Hinsichtlich einer ausführlichen Beschreibung der Testverfahren wird auf die Statistikliteratur verwiesen: FISZ /21/, HALD /25/, MARSAL /37/, TAUBENHEIM /51/. Der gesamte hier geschilderte Rechenablauf wurde in Algol 60 programmiert. Die Entwicklung des Programmes und die Berechnungen wurden am TR 440 des LEIBNIZ-Rechenzentrums der Bayerischen Akademie der Wissenschaften durchgeführt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Regression zwischen Schwefstoffgehalt und Abfluß

Regressionsgleichung		Korrelationskoeffizient	Linearitätstest	Test auf Normalverteilung von χ^2_1	Test auf Verteilung von σ^2	Bemerkung
Sylvenstein	$\eta = 1,40 \cdot \xi$	0,54	+	+	+	Korrelationskoeffizient nicht signifikant
52 - 59						
Sylvenstein	$\eta = 0,14 \cdot \xi$	0,12	+	+	+	
60 - 67						
München	$\eta = 1,82 \cdot \xi$	0,54	-	+	+	
50 - 59						
München	$\eta = 1,03 \cdot \xi$	0,32	+	-	+	
60 - 67						
Plattling	$\eta = 1,28 \cdot \xi$	0,43	+	+	+	
60 - 67						

Die Ergebnisse der Regressionsrechnung sind in Tab. 6 zusammengestellt. Sie enthält in der ersten Spalte die Regressionsfunktion zwischen η und ξ , in der zweiten den zugehörigen Korrelationskoeffizienten. Die Ergebnisse der Teste sind in den übrigen Spalten aufgeführt, wobei ein Minuszeichen für Ablehnung und im anderen Fall ein Pluszeichen steht. Im allgemeinen sind die Teste positiv ausgegangen; nur die Ergebnisse für die Meßstelle München sind in ihrer Aussagekraft eingeschränkt, da für den Zeitraum vor dem Speicherbau der Linearitätstest, für die Zeit danach der Test auf Normalverteilung der χ_i zur Ablehnung führte.

Die folgende Interpretation der Rechenergebnisse für die verschiedenen Varianzanteile bezieht sich nur auf den Schwebstoffgehalt als der geologisch bedeutsameren Größe. Die Ergebnisse sind auf Tab. 7 aufgetragen.

Tabelle 7: Varianz und Streuungsgewinn nach jedem Rechenschritt

	v_y	$\sigma_y'^2$	G_y	σ_n^2	G_n	σ_f^2	G_f
Sylvenstein 52 - 59	1,63	1,22	25%	1,17	28%	0,84	49%
Sylvenstein 60 - 67	0,53	0,38	29%	0,25	53%	0,24	54%
München 50 - 59	1,20	0,86	28%	0,82	32%	0,59	51%
München 60 - 67	0,65	0,45	31%	0,40	38%	0,36	44%
Plattling 60 - 67	0,51	0,43	16%	0,32	36%	0,23	54%

- a) J a h r e s g a n g : Der Varianzanteil, der auf den Jahresgang zurückzuführen ist, liegt bei fast allen untersuchten Zeitreihenabschnitten zwischen 25 und 30%, lediglich bei Plattling nur bei 16%. Im letzten Fall ist offenbar im tertiären Teil des Isareinzugs-

gebietes bis Plattling etwa gleichmäßig über das Jahr verteilt ein größerer Anteil von Feinmaterial als Schwebstoff verfügbar.

- b) **E r h a l t u n g s n e i g u n g** : Der Einfluß der Erhaltungsnegung auf die Varianz ist außer bei der Meßstelle Sylvenstein nach dem Speicherbau und bei der Meßstelle Plattling gering. Bei diesen beiden Meßstellen erreicht der durch die Erhaltungsnegung erklärbare Varianzanteil jedoch 20 % der Gesamtvarianz. Dieser vergleichsweise hohe Anteil wird bei der Meßstelle Sylvenstein durch den Stausee hervorgerufen: Durch die Speicherwirkung werden die während der Hochwasserperioden dem See zufließenden Schwebstoffmengen erst allmählich, über einen längeren Zeitraum verteilt, wieder abgegeben, soweit sie nicht vorher im Speicher sedimentiert wurden. Unterhalb des Speichers treten daher erhöhte Monatsmittelwerte in der Regel nicht einzeln, sondern in Folgen von zwei oder mehr Werten auf. Die deutliche Erhaltungsnegung im Schwebstoffgehalt der Meßstelle Plattling kann vielleicht ebenfalls durch die Speicherwirkung der oberstrom gelegenen Kraftwerksbecken gedeutet werden.

Ein Vergleich der auf Tab. 7 angeführten Varianzen zeigt, daß die höchsten durch Berücksichtigung der Erhaltungsnegung erzielten Streuungsgewinne mit den kleinsten Varianzen der Ausgangsdaten zusammentreffen.

- c) **D i e B e z i e h u n g z w i s c h e n S c h w e b s t o f f g e h a l t u n d A b f l u ß** : Durch den Sylvensteinstausee wurde der Zusammenhang zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluß unmittelbar unterhalb des Speichers empfindlich, bei München immer noch spürbar, gestört. Vor dem Einstau lag der Korrelationskoeffizient sowohl für München wie für Sylvenstein mit 0,54 verhältnismäßig hoch. Der zusätzliche Streuungsgewinn beim Schwebstoffgehalt betrug für diesen Rechenschritt bei beiden Meßstellen etwa 20%. Die Regressionsgerade hatte beim Sylvenstein

eine Steigung von 1,4 bei München von 1,8. Die Auswirkung des Einstaues war, wie nicht anders zu erwarten, für Sylvenstein am stärksten spürbar: Der Korrelationskoeffizient sank unter die Signifikanzschwelle von 95 % ab, der Regressionskoeffizient fiel auf 0,14 und war damit ebenfalls nicht mehr signifikant von Null verschieden. Das bedeutet, daß zwischen Schwebstoffgehalt und Abfluß statistisch kein linearer Zusammenhang mehr besteht. Für München ist dagegen die Abnahme der Steigung der Regressionsgeraden auf 1,0 und des Korrelationskoeffizienten auf 0,32 deutlich geringer. Der zusätzliche Streuungsgewinn ist für die Zeit nach dem Speichereinstau bei beiden Meßstellen vernachlässigbar klein. Die Veränderungen der Regressionsgeraden sind auf Abb. 18 dargestellt; die Wirkung des Speichersees kommt hierin klar zum Ausdruck. Die starke Abschwächung des Speichereinflusses bis München wird durch den auf der Fließstrecke erzeugten Geschiebeschweb aus der Isar selbst sowie durch den Schwebstofftrieb der Zuflüsse bewirkt.

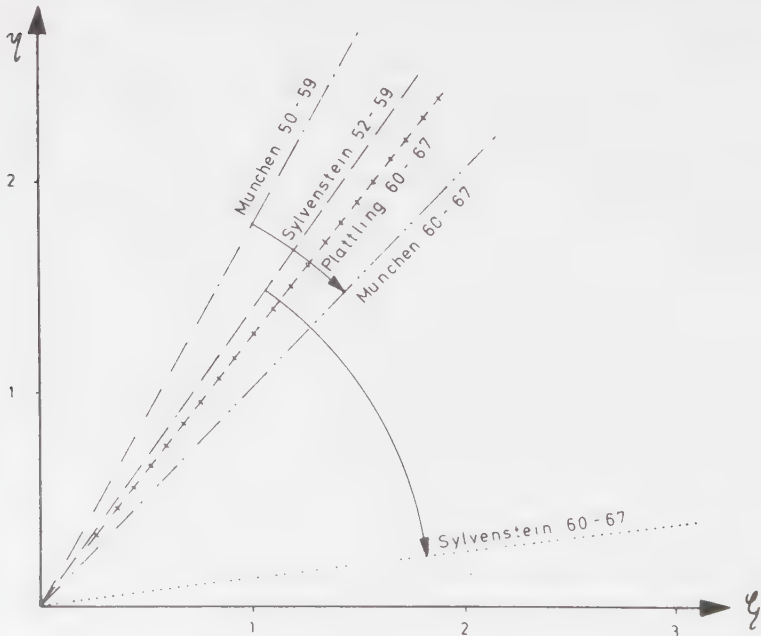


Abb 18 Regressionsfunktionen zwischen den Variablen ξ und η

Insbesondere die trotz der Klärwirkung des Kochelsees noch verhältnismäßig schwebstoffreiche Loisach macht sich dabei bemerkbar: Sporadische Vergleichsmessungen im Bereich des engeren Untersuchungsgebietes kurz oberhalb des Zusammenflusses zeigten für die Loisach einen etwas höheren Schwebstoffgehalt an als für die Isar (Abb. 17).

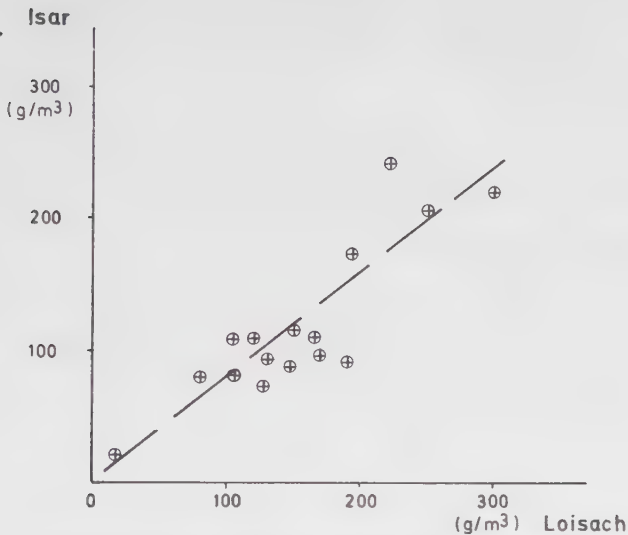


Abb.17: Verhältnis der Schwebstoffkonzentrationen in Loisach und Isar

Die in der letzten Spalte der Tab. 7 aufgetragenen Werte für den gesamten Streuungsgewinn sind etwa gleich; lediglich der Wert für München von 60 - 67 fällt leicht ab; Hieraus lassen sich keine Beeinflussungen erkennen.

Die Ergebnisse zeigen, daß durch Untersuchungen in der Form, wie sie hier durchgeführt wurden, die Beeinflussungen und Zusammenhänge von Zeitreihen in anschaulicher Form verdeut-

licht werden können. Ähnliche Untersuchungen jedoch mit dem Ziel einer Prognose wurden von RODRIGUEZ-JTURBE /43/ durchgeführt: Er untersuchte z.B. die Verteilung der χ^2 -Werte und erzeugte Reihe von Zufallszahlen mit derselben Verteilung. Nach Addition der deterministischen Anteile erhielt er daraus in Abhängigkeit von einer simulierten Abflußreihe künstliche Datenreihe des Schwebstoffgehaltes, die statistisch die gleichen Eigenschaften besaßen, wie die Ausgangsdaten. Damit ergibt sich die Möglichkeit, lückenhaft Datenreihen zu ergänzen und langjährige Mittel- oder Extremwerte abzuschätzen.

4. D A S G R U N D W A S S E R

4.1 DIE GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Der Grundwasserstrom in der Pupplinger Au wird zum größten Teil durch Uferfiltrat von der Isar gespeist. Hinzu kommt der lokale Niederschlag, der Hangabfluß von den Moränenwällen, das Grundwasser aus dem Gebiet jenseits der Isar, das stellenweise den Fluß unterquert und schließlich das Grundwasser aus den Schottern des Neufahrner Höhenzuges, das teils direkt in den Grundwasserleiter der Pupplinger Au übertritt, teils als Quellwasser über undurchlässigem Tertiär austritt und nach kurzem Lauf in den Schottern der Au versickert. Im südlichen Bereich wird ein Teil dieses Wassers heute abgefangen: Der "Kalte Bach", früher zum Betrieb einiger Mühlen in Puppling genutzt, wurde etwa hangparallel nach Süden abgeleitet und fängt seither die Zuflüsse aus den Moränen ab. Südlich von Puppling kehrt er nach Nordwesten um und versickert nach kurzem Lauf in den Schottern der Au, ohne die Isar zu erreichen. Der Riedbach hat sein Einzugsgebiet überwiegend in dem mit Moränenmaterial überzogenen südlichen Teil des Neufahrner Höhenrückens. Er hat sein Bett in der Pupplinger Au weitgehend abgedichtet, wie aus den unbeeinflussten Ganglinien des in unmittelbarer Nähe





Abb. 20a

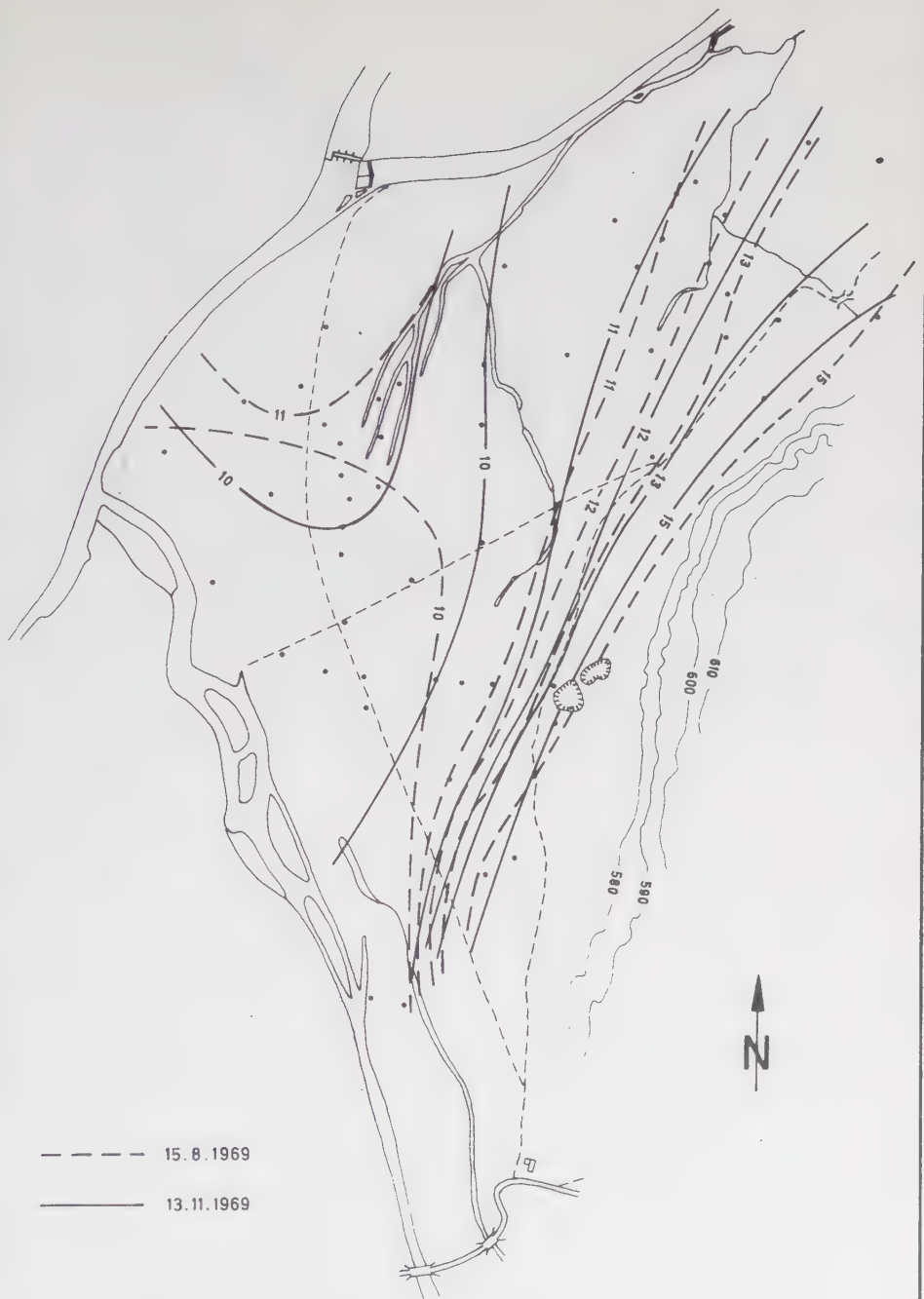
Leitfähigkeit in μS





Abb. 20c

• Gesamthärte in °d



--- 15. 8. 1969
— 13. 11. 1969



Abb.20e

SiO_2 - Gehalt in mg/l



----- 15.8.1969

———— 13.11.1969

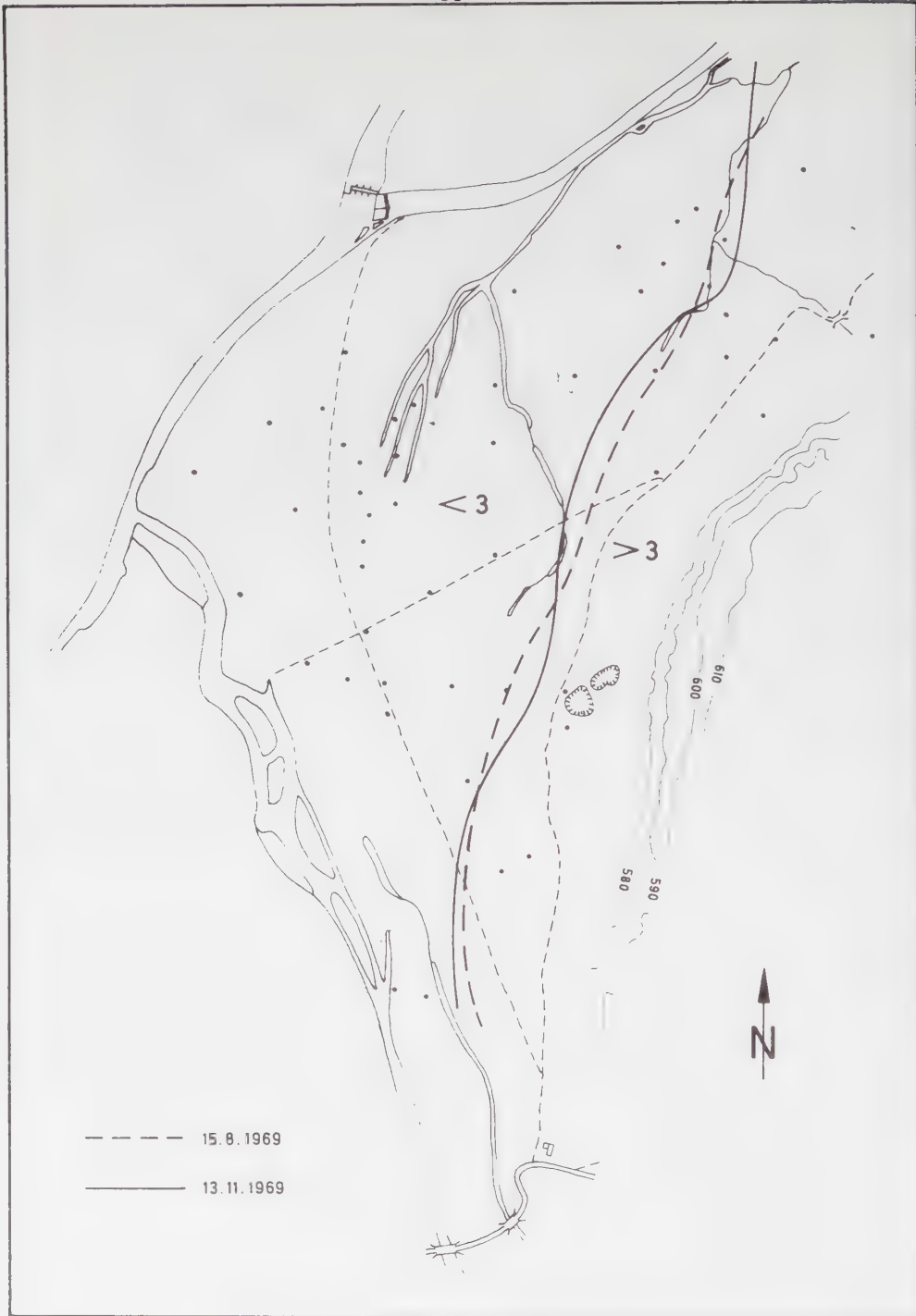


Abb. 20g

CL^- - Gehalt in mg/l

des Baches gelegenen Pegel 19 zu ersehen ist.

Zur näheren Untersuchung der unterschiedlichen Herkunft des Grundwassers wurden chemische Wasseranalysen durchgeführt. Am 15.8. und 13.11.1969 wurden aus fast allen Pegelrohren in der Pupplinger Au Wasserproben abgepumpt und im Labor der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde untersucht. Gemessen wurden: der Abdampfrückstand, die Leitfähigkeit, die Gesamthärte und die Karbonathärte sowie ergänzend dazu der Cl^- , SiO_2 - und NO_3 -Gehalt. Als Beispiel wurden die Ergebnisse der Messung vom 11. - 15.11.1969 auf Tab. 8 zusammengestellt. Auf Abb. 19 sind für die Untersuchungszeitpunkte die Isohypsen dargestellt, die für die Entnahmezeiten gelten: Beide Darstellungen zeigen Niedrigwasserstände. Zwischen den beiden Meßzeitpunkten war der Grundwasserspiegel nur geringfügig gefallen. Aus den Konzentrationsverteilungen auf den Abbildungen 20a-g - dargestellt durch Linien gleicher Konzentration - lassen sich gut die Bereiche erkennen, in denen jeweils bestimmte Neubildungskomponenten überwiegen. Im einzelnen ergibt sich folgendes Bild:

Tabelle 8: Chemismus des Grundwassers in der Pupplinger Au am 13.11.1969

Meß- stelle	Leitfähig- keit	Abdampf- rückstände	Gesamt- härte	Karbonat- härte	SiO_2	Cl	NO_3
	μS	mg/l	$^\circ\text{dH}$	$^\circ\text{dH}$	mg/l	mg/l	mg/l
D	343	240	12.3	10.6	2	2.5	3
E	327	230	12.0	10.0	2	0.9	2
F	347	236	11.8	10.6	3	1.6	2
G	385	279	14.3	13.1	4	5.2	4
H	313	225	11.8	10.1	2	1.3	2
J	322	230	12.1	10.0	2	1.4	3
L	364	260	13.6	12.2	3	5.1	4
N	380	308.5	16.1	15.4	5	6.2	4

Tab. 8 Fortsetzung

Meß- stelle	Leit- fähig- keit	Abdampf- rückstände	Gesamt- härte	Karbonat- härte	SiO ₂	C ₁	NO ₃
O	321	228	11.8	10.5	2	1.3	3
P	330	225	11.8	10.0	2	1.2	3
Q	326	-	11.5	9.8	2	1.2	3
R	332	224	11.7	10.3	2	1.2	3
1c	319	222	11.8	10.1	2	1.2	3
2	316	221	11.5	10.0	1	1.0	4
3	332	221	11.6	10.1	1	0.8	3
4	321	230	11.8	10.2	1	0.9	3
5	321	220	11.8	10.3	1	1.3	3
6	315	237	11.9	10.3	2	0.8	3
7	332	230	11.8	10.1	2	1.0	3
8	340	230	11.8	10.1	2	1.0	3
9	346	229	11.9	10.3	2	1.2	2
10	347	296	11.9	10.3	2	1.2	2
11	372	280	14.0	12.8	3	7.8	3
12	413	288	15.3	13.7	4	6.8	4
13	369	261	13.6	12.3	3	4.8	3
14	340	238	12.2	11.1	2	1.3	2
15	344	232	12.3	11.1	2	1.5	2
16	322	223	11.5	10.5	2	0.6	3
17	342	233	12.1	11.0	1	1.2	3
18	337	232	12.3	11.1	2	1.5	3
19	341	241	13.1	11.3	2	2.3	3
20	366	260	13.5	12.2	3	5.6	3
21	464	337	17.0	15.9	6	10.5	7
22	450	335	17.0	16.0	5	10.7	6
23	331	230	11.9	10.1	1	1.0	3
24	329	236	12.3	10.3	1	1.2	3
25	325	227	11.9	10.0	1	1.0	3
26	322	232	11.8	10.1	1	1.2	3
27	342	238	11.9	9.9	2	1.0	3
28	293	-	10.6	9.5	3	1.0	3
29	342	237	12.3	10.7	3	1.1	3
30	338	240	12.4	10.6	3	1.0	3
XIII	321	222	12.4	10.6	3	1.0	3

Tab. 8 Fortsetzung

Meß- stelle	Leit- fähig- keit	Abdampf- rückstände	Gesamt- härte	Karbonat- härte	SiO ₂	C ₁	NO ₃
XIV	327	228	11.8	10.1	2	1.0	3
Br.5	338	235	12.2	10.8	2	1.0	3
Br.6	326	230	12.2	11.1	2	1.1	3
Kies- grube	393	-	16.2	15.0	4	9.7	5
Isar	319	220	11.2	9.6	1	0.9	2
Loi- sach	296	206	10.8	10.6	1	0.9	3
Ried- bach	452	319	16.5	15.4	6	7.0	4

Die absoluten Extrema der Konzentration finden sich an den Rändern des Gebietes. (Tab. 8): Die Isar liegt mit allen gemessenen Konzentrationswerten an der unteren Grenze; die höchsten Werte treten dagegen am Ostrand des Grundwasserleiters am Fuß der Moräne auf (z.B. Meßstelle N, 12, G). Zwischen diesen beiden Grenzen finden sich alle Übergänge. Der an gelösten Stoffen reiche Grundwasserzufluß aus den Schottern des Neufahrner Höhenrückens führt zu einer hohen Konzentration am Fuß der Wallmoräne, die zur Isar hin zunächst sehr stark, dann zunehmend langsamer abfällt. Der mittlere Bereich - von der Isar südlich der Loisachmündung ausgehend und in nord-östlicher Richtung verlaufend - zeigt die geringsten Konzentrationen. Er kennzeichnet offensichtlich den Weg, den der Hauptstrom des an Lösungsgehalt armen Infiltrationswassers von der Isar durch die Pupplinger Au nimmt. Im Nordwesten, etwa auf der Höhe der Loisacheinmündung beginnend, steigen die Konzentrationen wieder deutlich an. Dieser Anstieg wird entweder durch den die Isar unterquerenden Grundwasserstrom vom jenseitigen Talrand oder durch den Grundwasserbegleitstrom der Loisach, der aus der Schotterrinne im Seeton unter der Weidacher Au zur Pupplinger Au hinüberdringt, verursacht. Eine genaue Untersuchung war nicht möglich, da die Pegel in der Weidacher Au fast alle zerstört waren.

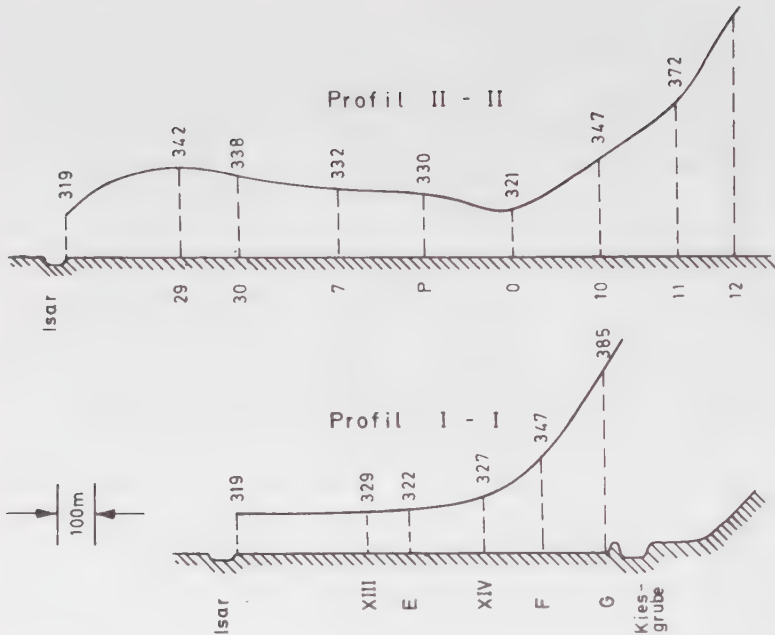


Abb.21: Leitfähigkeiten, gemessen am 15.11.1969

Auf Abb. 21 ist zur Verdeutlichung der geschilderten Verhältnisse für zwei Profile die Leitfähigkeit aufgetragen. Im Profil I-I im Süden (Lage s. Abb. 1) reicht die Zone, in der die Isar den Grundwasserstrom bestimmt, etwa bis zum Pegel XIV. Im Profil II-II dagegen beginnt unmittelbar neben dem Fluß zunächst eine durch den Zufluß vom jenseitigen Uferbereich beeinflusste Zone; daran schließt etwa bei Pegel 7 beginnend und nur wenig über Pegel 0 hinausreichend der von der Isar gespeiste Grundwasserstrom an, während bei Pegel 10 bereits deutlich der Einfluß vom Hang her erkennbar ist.

Tabelle 9: Chemismus der Wässer aus den Schottern des Neufahrner Beckens

	Abdampf- rück- stand g/l	Gesamt- härte °dH	Karbonat- härte °dH	Silikat mg/l	Chlorid mg/l
Tiefbrunnen Deinning	0,342	19,1	18,6	0,62	3,72
Tiefbrunnen Bauer-Ergertshsn.	0,460	21,2	19,7	2,25	3,68
Quellfassung Puppling	0,399	20,4	19,8	1,22	3,86
Kalter Bach Quelle	0,392	19,3	17,8	1,05	3,83
Hornstein Wasserversorgung	0,400	21,0	19,1	0,84	3,95

An den Entnahmezeitpunkten dürfte der oberflächennahe Hangabfluß keine Rolle gespielt haben, da in beiden Fällen längere Trockenperioden voraus gegangen waren. Um dies zu belegen, sind auf der Tab. 9 einige Analysendaten von Wasserproben aus dem Neufahrner Höhenrücken aufgeführt. Ein Vergleich mit dem Chemismus des hangnahen Grundwassers der Au zeigt, daß in Richtung auf den Hang zu die Konzentrationen tatsächlich gegen die Tabellenwerte streben und keine Verdünnung durch versickernden Hangabfluß erkennen lassen. Lediglich die Gehalte an NO_3 und Cl sind bei den Pegeln 21 und 22 wesentlich höher (siehe Tab. 8), doch werden diese Werte durch Verunreinigungen durch landwirtschaftliche Betriebe verursacht, die im Süden dem hangnahen Grundwasser von der Oberfläche zusickern.

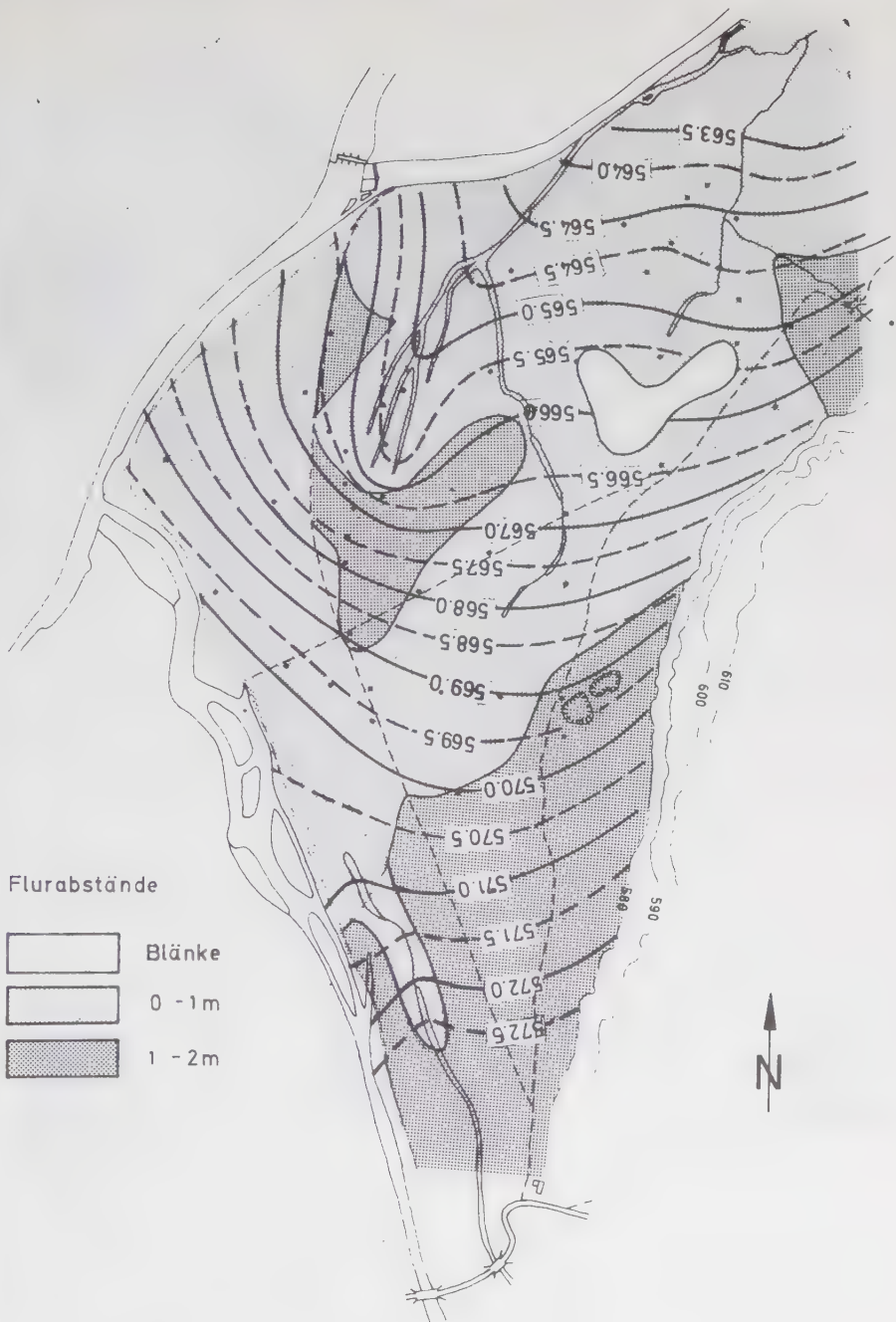
Die Untersuchungen auf die verschiedenen Inhaltsstoffe des Grundwassers führen im wesentlichen zu dem gleichen Ergebnis. Es zeigt sich, daß in diesem Falle die Bestimmung der Leitfähigkeit, wie sie unmittelbar im Gelände festgestellt werden kann, ausgereicht hätte. Ein Vergleich der chemischen

Konzentrationen im August mit denen im November ergibt eine gegenseitige Bestätigung: Selbst die geringen Unterschiede in Form einer leichten Konzentrationsverringerung im November lassen sich durch den infolge der anhaltenden Trockenheit verminderten Zustrom aus dem Grundwasserspeicher des Neufahrner Höhenrückens und aus dem Gebiet jenseits der Isar erklären.

4.2 DIE GRUNDWASSERSTANDS-SCHWANKUNGEN

Neben den Isohypsenplänen, die als Ergänzung zu den chemischen Untersuchungen erstellt wurden, liegen Isohypsendarstellungen von HW, MW und NW vor (Abb. 22a - c). Danach speist die Isar bei Hochwasser entlang der nördlichen und mittleren Uferstrecke der Pupplinger Au in das Grundwasser ein. Bei Mittelwasser tritt Uferfiltrat nur im mittleren Bereich von der Loisachmündung bis ungefähr 1,5 km nach Süden in das Grundwasser über. Im Süden hat sich die Isar im Bereich der Regulierungsstrecke so stark eingetieft, daß heute selbst bei Hochwasser noch Grundwasser zum Fluß hin anstritt. Der Kalte Bach, der größtenteils aus dem Grundwasser des Neufahrner Höhenrückens gespeist wird und daher ausreichend Wasser führt, sorgt hier ganzjährig für erhöhte Grundwasserstände gegenüber der Isar: Wie schon erwähnt, gibt er, nachdem er bei Puppling auf die jüngste Talaue herabgefloßen ist, sein gesamtes Wasser auf einer mehrere hundert Meter langen Versickerungsstrecke an das Grundwasser ab. Bemerkenswerterweise zeigen die Verteilungen der chemischen Konzentrationen keine Erhöhung in diesem Gebiet, obgleich es sich bei dem versickernden Abfluß des Kalten Baches ursprünglich überwiegend um Grundwasserzufluß vom Talrand her handelt. Offenbar haben sich die Konzentrationen während der Dauer des Fließvorganges an der Oberfläche durch Ausfällungen stark ermäßigt.

Die Flurabstände sind auf den gleichen Karten dargestellt. Sie nehmen nach Norden zu ab. Ihre Schwankungen werden mehr



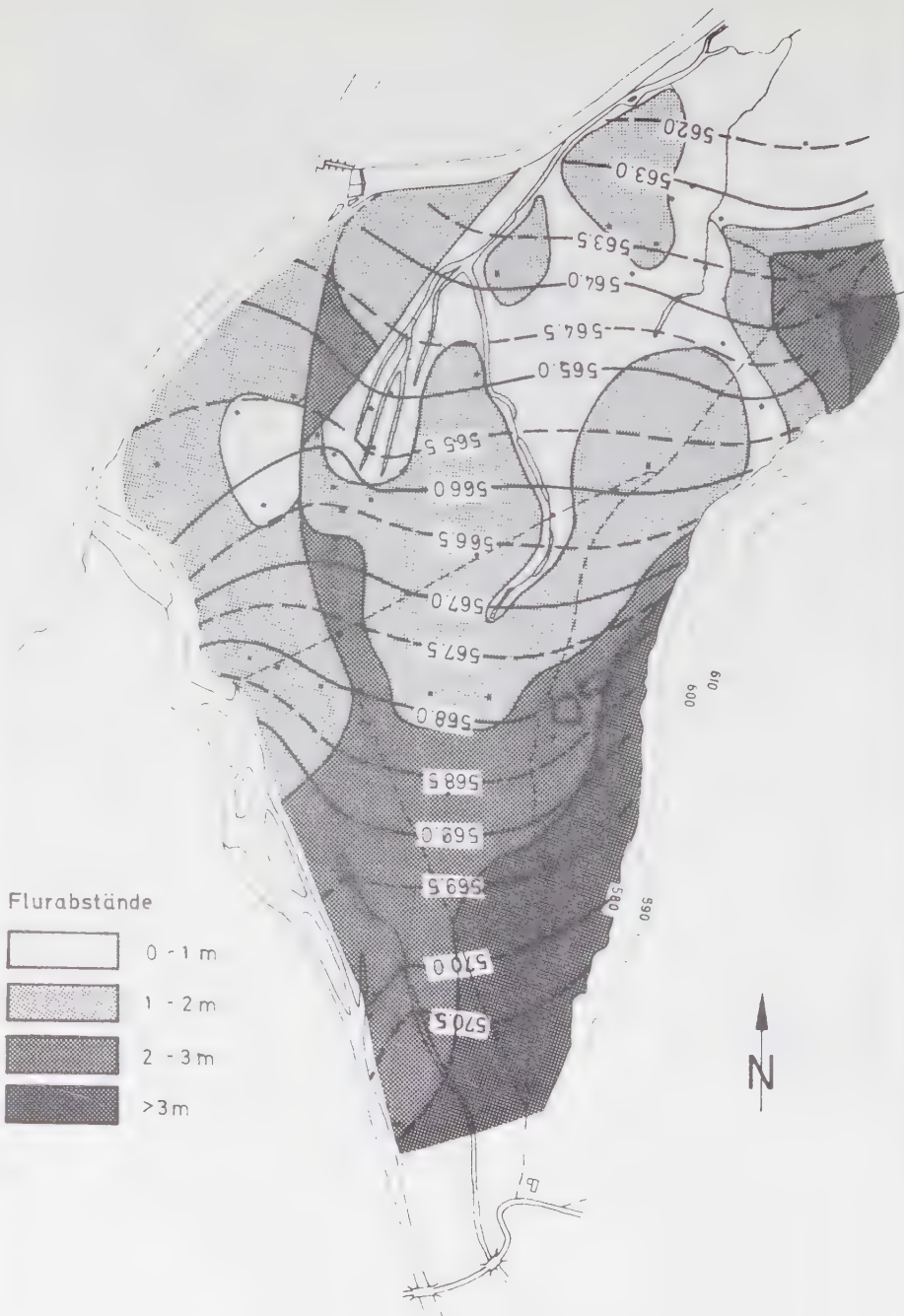
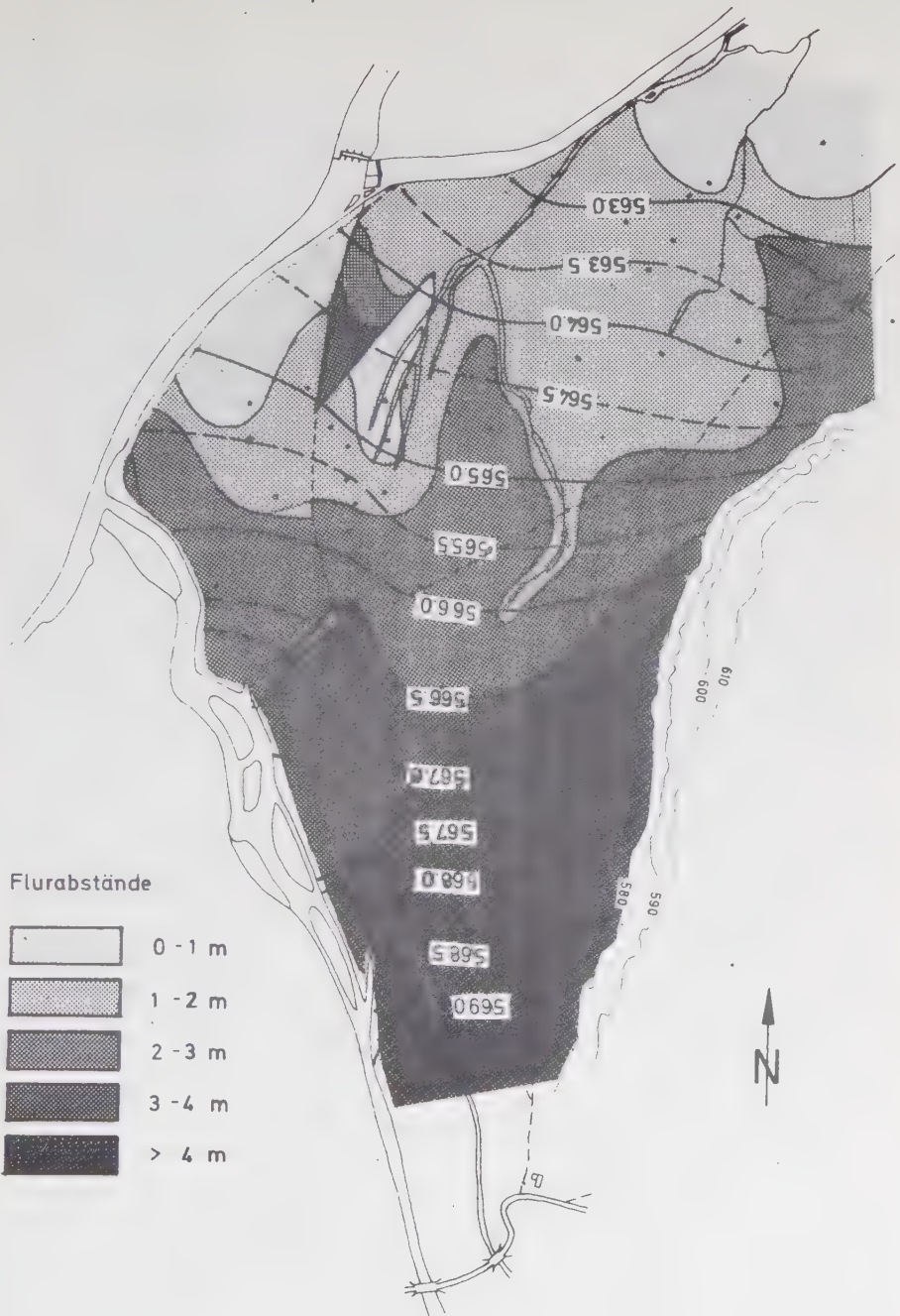


Abb.22b

Isohypsen und Flurabstände MW 4.7.1964



durch Geländeunebenheiten als durch die Reliefunterschiede in der Grundwasseroberfläche bestimmt.

Die dargestellten Isohypsen zeigen im allgemeinen einen recht ausgeglichenen Verlauf. Nur in dem Gebiet nördlich von Brunnen 1 weichen sie wegen der dort zahlreichen durch Grundwasser gespeisten Rinnsale erheblich nach Süden zurück. Diese Bäche, - von denen einer selbst bei extremen Niedrigwasserständen nicht versiegt, während die übrigen erst bei Mittel- und Hochwasser anspringen - erzeugen durch die Fixierung des Grundwasserspiegels auf der Kote der Bachwasseroberfläche ein mit steigendem Isarwasserstand wachsendes Gefälle vom Fluß landeinwärts. Hierin dürfte die Ursache für den bei Hochwasser besonders starken Zustrom von Isarwasser in die Pupplinger Au zwischen Loisach und Ickinger Wehr zu suchen sein. Die Grundwasserbäche werden zusammen mit dem Riedbach und anderen kleinen Gräben in einem Sammler vereinigt, der parallel zum Isar-Werkkanal angelegt wurde. Nördlich der Aumühle wird dieser Sammler unter dem Kanal hindurch geführt und der Isar zugeleitet.

Das Grundwasser strömt auf der ganzen Strecke zwischen Ickinger Wehr und der Aumühle unter dem überall abgedichteten Kanal hindurch. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters ist in diesem nördlichen Teil so gering, daß bei Hochwasser die Grundwasserbäche und der unterirdische Abfluß den Wasserandrang nicht bewältigen, so daß tief gelegene Teile des Gebietes überschwemmt werden. Das Gebiet ist stellenweise vermoort. Wegen des auch bei Niedrigwasser sehr geringen Flurabstandes ist in diesem Teil der Pupplinger Au mit Evapotranspiration aus dem Grundwasser zu rechnen.

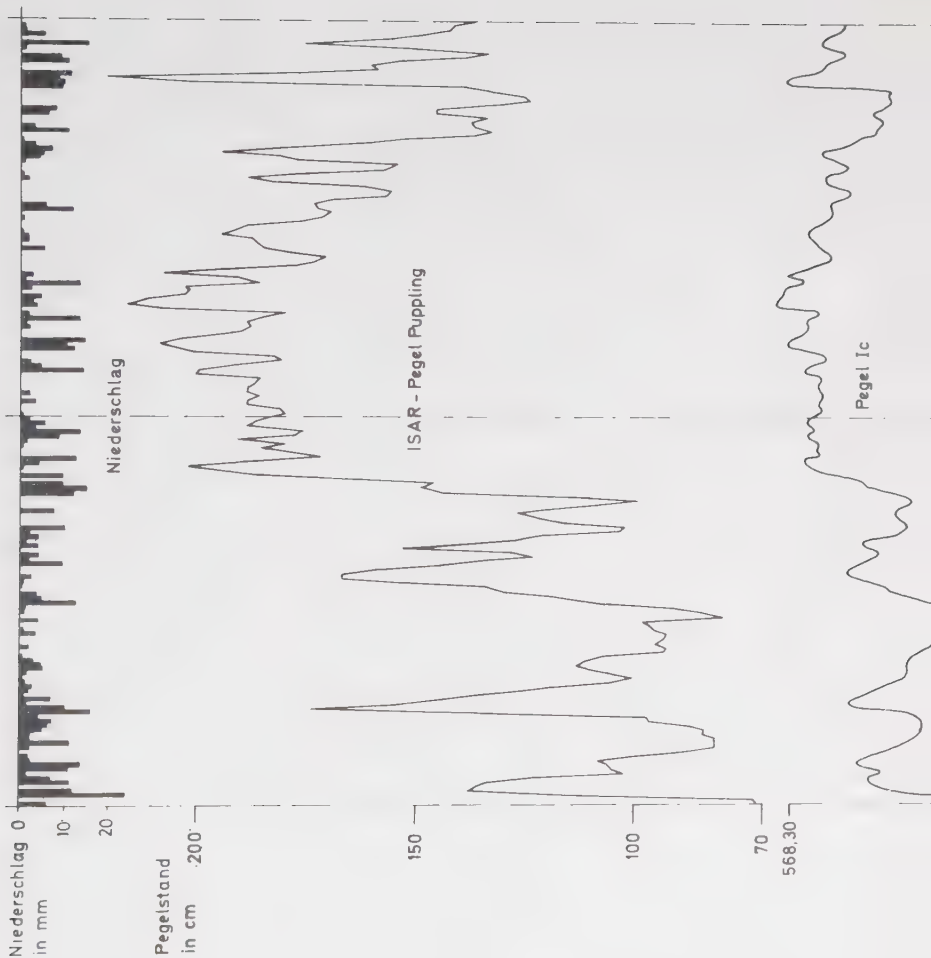
Neben der bisher geschilderten generellen Situation bei Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserständen enthalten insbesondere die Schwankungen der Wasserstandsganglinien Informationen über die Beeinflussung des Grundwasserkörpers. Allgemein lassen sich in der Pupplinger Au die Einflüsse auf die

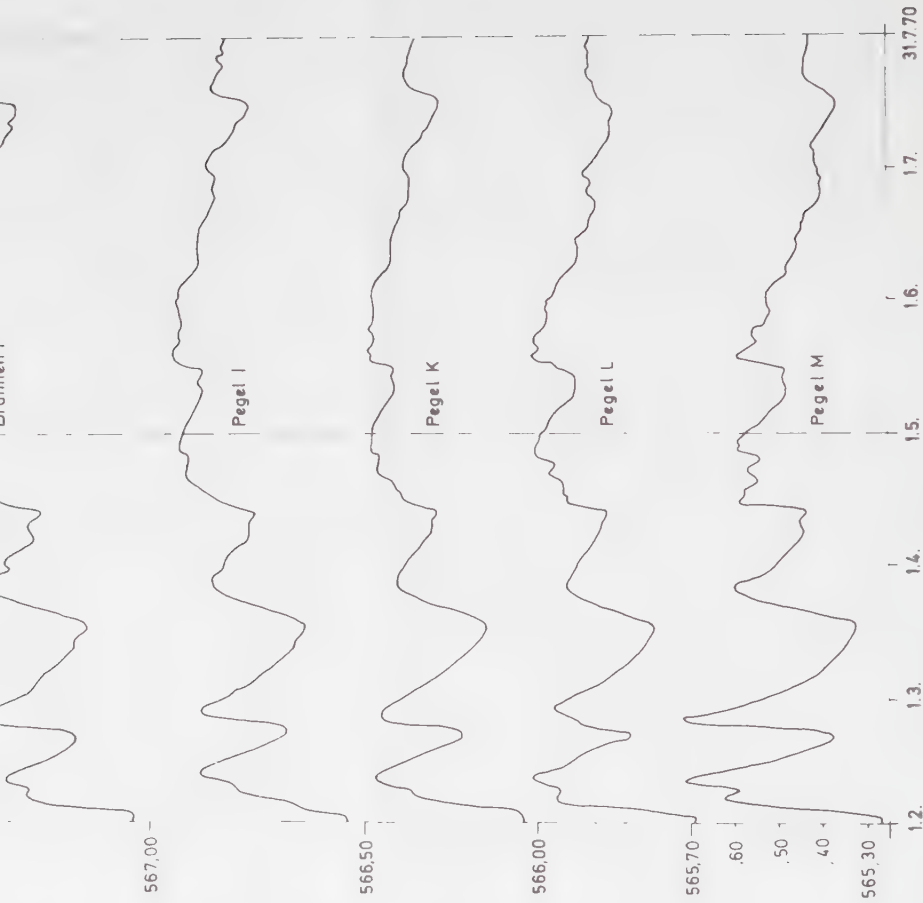
Grundwasserstandsschwankungen folgendermaßen gliedern:

- Versickerung von der Oberfläche her (Niederschlag)
- Ausbreitung von Wellen, die von den Rändern (Isar bzw. Hang) ausgehen
- Versickerung von Zuflüssen (Kalter Bach, Riedbach)
- Absenkung zu Vorflutern in der Au (Grundwasserbäche)
- Einfluß der Kiesgruben und - bei Hochwasser - von Grundwasserblänken
- Evapotranspiration, z.T. aus dem Grundwasser.

Der ursächlich wirkende Prozeß ist dabei der Niederschlag. Sein Einfluß auf die Grundwasserstandsschwankungen ist jedoch sehr unterschiedlich, je nachdem, ob er in Oberflächenabfluß, in Versickerung oder in Grundwasserzustrom übersetzt am Beobachtungsort eintrifft, bzw. welche dieser Möglichkeiten jeweils überwiegt. Am unmittelbarsten, d.h. mit geringster Laufzeitverschiebung, wird er in Isar- und hangnahen Bereichen sowie an Stellen mit geringem Flurabstand und damit geringem Sickerweg wirken. Nun sind zwar die Flurabstände in der Pupplinger Au durchweg gering, doch auch die durch Sickerwasser verursachten Schwankungen der Grundwasserstands-Ganglinien sind klein gegenüber den durch die Isarwasserstände und den Hangabfluß bewirkten. Bis zu einer gewissen Entfernung vom Rand werden also die von dort her verzögert und zunehmend gedämpft eintreffenden Wellen alle anderen Einflüsse überdecken.

Die offenen Gewässer neben der Isar und dem weitgehend abgedichteten Riedbach haben auf die Grundwasserstände in ihrer Umgebung eine ausgleichende Wirkung. Alle zeigen selbst nur geringe Wasserstandsschwankungen, da sie überwiegend von Grundwasser gespeist werden. Während die Reichweite der Beeinflussung durch die Grundwasserbäche und den Kalten Bach in Richtung des leeseitig abströmenden Grundwassers durch





Grundwasserstands-Ganglinien I

Abb. 23a

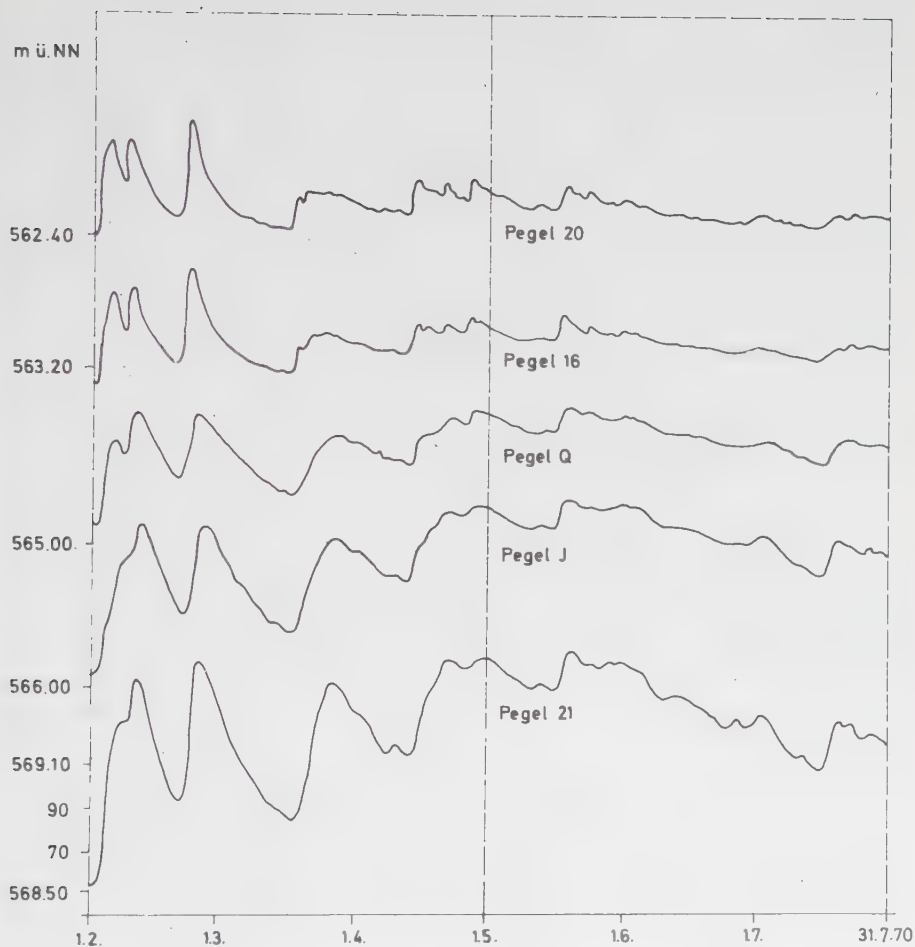


Abb. 23b

Grundwasserstands-Ganglinien II

Zugabe oder Ableitung groß ist, bestimmen die Kiesgrube und die Blänken die Schwankungen der Grundwasserstände nur im zugehörigen Absenkungs- oder Auffüllbereich.

Die Evapotranspiration kann einerseits selbst einen Tagesgang im Assimilationsrhythmus der Pflanzen erzeugen, zum anderen wirkt sie dämpfend durch Schaffung von Speicher-
raum für Sickerwasser.

Bereits ein qualitativer Ganglinienvergleich zwischen Isarnahen und hangnahen Pegeln läßt generell die unterschiedliche Beeinflussung erkennen: Die Höchstwasserstände der auf Abb. 23 dargestellten Ganglinien liegen bei den flußnahen im Sommer, bei den hangnahen im Frühling. Die ansteigenden und abfallenden Äste der Ganglinien sind bei den fluß- und hangnahen Pegeln steil, bei den übrigen dagegen abgeflacht. Bei den hangnahen Pegeln fällt außerdem eine besonders starke konkave Krümmung der abfallenden Ganglinienäste auf. Sie wird dort bewirkt durch das Fehlen des rückwärtigen Grundwassereinzugsgebietes. Eine vor dem Hangfluß aufgebaute Grundwasseranschwellung sinkt daher schnell in sich zusammen, wenn der Zustrom von der Oberfläche aufhört. Zur quantitativen Darstellung der Beeinflussung der Grundwasserstands-Ganglinie wurde die Kreuz-Korrelationsrechnung herangezogen. Diese Methode wurde in jüngster Zeit auch von ELGIZAWI /18/ bei der Untersuchung von Grund- und Flußwasserbeziehungen im Nildelta mit Erfolg angewandt.

Die Kreuz-Korrelationsrechnung eignet sich gut zur Untersuchung von Fällen, bei denen die Realisierung $x(t)$ eines Prozesses $X(t)$ mit der Realisierung $y(t)$ eines Prozesses $Y(t)$ verglichen werden soll. Prozesse sind dabei Erscheinungen, die in ihrem zeitlichen Ablauf zufälligen Veränderungen bzw. Schwankungen unterworfen sind. Im vorliegenden Fall wäre z.B. anstelle von $x(t)$ die Wasserstandsganglinie der Isar, für $y(t)$ eine der Grundwasserstands-Ganglinien einzusetzen. Die Kreuz-Korrelationsfunktion

$K_{xy}(\tau)$ erhält man, wenn man jeweils für die Werte $x(t)$ des einen Prozesses und $y(t + \tau)$ des anderen Prozesses die Korrelationskoeffizienten berechnet. Es werden also $x(t)$ und $y(t)$ zeitlich gegeneinander verschoben, wobei der Verschiebungsbetrag positiv oder negativ sein kann ($\tau \geq 0$). Der Vorteil dieser Betrachtungsweise gegenüber der Beschreibung einer Ähnlichkeit durch den gewöhnlichen Korrelationskoeffizienten liegt darin, daß auf diesem Wege auch eine zeitlich verzögerte Beeinflussung des einen Prozesses durch einen anderen oder beider Prozesse durch einen dritten erfaßt werden können: Stellen $X(t)$ und $Y(t)$ zwei Prozesse an zwei verschiedenen Orten dar, wobei der Prozeß $Y(t)$ spürbar durch die Schwankungen des Prozesses $X(t)$ beeinflusst wird, diese Schwankungen jedoch erst nach einer gewissen Laufzeit am Ort von $Y(t)$ eintreffen, so erreicht die Kreuz-Korrelationsfunktion $K_{xy}(\tau)$ ihr Maximum nicht bei $K_{xy}(\tau = 0)$ (= gewöhnlicher Korrelationskoeffizient), sondern erst nach einer zeitlichen Verzögerung, die der Laufzeit entspricht. Hat man die Kreuz-Korrelationsfunktion und damit die Laufzeit an verschiedenen Orten, so läßt sich auf einfache Weise die Drift-richtung der von $x(t)$ erzeugten Schwankungen ermitteln. Der maximale Wert der Kreuz-Korrelationsfunktion gibt an, wie stark der an der betreffenden Stelle noch wirksame Einfluß der Schwankungen ist. Aus dem Verlauf der Funktion lassen sich außerdem Rückschlüsse auf den Charakter der Schwankungen ziehen: Folgen diese zum Beispiel einer Schwingung mit gleichbleibender Frequenz, so enthält auch die Funktion eine Schwingung derselben Frequenz.

Die allgemeine Formel für die Berechnung der Korrelationsfunktion lautet (RALSTON & WILF /42/):

$$K_{xx}(\tau) = \frac{(N-\tau) \cdot \sum_{i=1}^{N-\tau} x_i \cdot x_{i+\tau} - \left(\sum_{i=1}^{N-\tau} x_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{N-\tau} x_{i+\tau} \right)}{\sqrt{(N-\tau) \cdot \sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{N-\tau} x_i \right)^2} \cdot \sqrt{(N-\tau) \cdot \sum_{i=1}^{N-\tau} (x_{i+\tau})^2 - \left(\sum_{i=1}^{N-\tau} x_{i+\tau} \right)^2}}$$

Hierin bedeutet N die Anzahl der Tage einer ganzen Periode. Für die Kreuz-Korrelationsfunktion $K_{xy}(\tau)$ wird für die um τ verschobenen Glieder jeweils $y(t + \tau)$ eingesetzt.

Bei der Anwendung der Kreuz-Korrelationsrechnung zur Untersuchung der Beeinflussung der Grundwasserstandsschwankungen in der Pupplinger Au scheinen zunächst Korrelationen mit den Niederschlagshöhen am geeignetsten zu sein, da alle anderen Einflußgrößen indirekt von diesen Werten abhängen. Die Niederschlagstagesummen sind jedoch als diskrete Größen, die lediglich intervallweise von Null verschiedene Beträge annehmen, nur schlecht mit den aus kontinuierlichen Ganglinien gewonnenen Wasserstandswerten vergleichbar. Stattdessen wurden daher die Isarwasserstände herangezogen. Da jedoch die Wasserstandsganglinie der Isar im Bereich der Pupplinger Au kaum eine Verzögerung gegenüber den dort registrierten Niederschlagswerten aufweist, können in erster Näherung trotzdem die Zeitverschiebungen der Maxima der Korrelationsfunktionen zwischen Isar- und Grundwasserganglinien als Verzögerung der Grundwasserreaktion auf den Niederschlag gewertet werden. Darüber hinaus kann durch einen Vergleich zwischen dem allgemeinen Verlauf der Kreuz-Korrelationsfunktionen und der Autokorrelationsfunktion der Isar auf die Ähnlichkeit im Verhalten zwischen Isar- und Grundwasserständengeschlossen werden: Berechnet man für eine senkrecht zum Vorfluter ausgerichtete Kette von Pegeln die Kreuz-Korrelationsfunktionen zwischen den Vorflutwasserständen und den Pegelganglinien und trägt man diese Funktion in Abhängigkeit vom Abstand l bis zum Vorfluter auf, so ist an der Stelle $l = 0$ die Autokorrelationsfunktion der Vorflutwasserstände aufzutragen. Im Normalfall werden sich die Kreuzkorrelationsfunktionen mit abnehmendem l dieser Autokorrelationsfunktion immer mehr angleichen.

Nun werden auch die Grundwasserstände in der Pupplinger Au, je nach Lage zum Fluß, eine ganz unterschiedliche Ähnlichkeit mit den Isarwasserständen aufweisen. Infolgedessen



Verzögerung der G.W.-Ganglinien gegen
die Isarwasserstände in Tagen



Verzögerung der G.W.-Ganglinien gegen
die Isarwasserstände in Tagen.

muß man am abnehmenden Grad der Übereinstimmung zwischen der Autokorrelationsfunktion der Isar und den Kreuz-Korrelationsfunktionen zwischen der Isar und zunehmend flußfernen Grundwasserpegeln Ausmaß und Reichweite des Isareinflusses ablesen können.

Weil Ausmaß, Reichweite und zeitliche Verschiebung der Beeinflussung je nach Dauer und Höhe der Schwankungen sehr verschieden sein können, wurden für die Untersuchung zwei charakteristische, aufeinanderfolgende Ganglinienabschnitte ausgewählt (Abb. 23 a, b). Die erste Periode erstreckt sich vom 1.2. bis zum 30.4.1970 und ist gekennzeichnet durch ausgeprägt hohe und anhaltende Frühjahrshochwasser. Die zweite Periode vom 1.5. bis zum 31.7.1970 wird beherrscht durch kürzere, im allgemeinen weniger ausgeprägte Sommerhochwasser bei im Mittel höheren Wasserständen mit fallender Tendenz. Die Ganglinien wurden in Tageswerte unterteilt und die Kreuz-Korrelationsfunktion diskret für Verschiebungsbeträge von jeweils einem Tag berechnet. Dieses Zeitintervall ist ausreichend kurz, um alle Schwankungen der Wasserstände zu erfassen. Die Verschiebung wurde auf insgesamt 30 Tage ausgedehnt. Das erscheint im Vergleich zur Länge der betrachteten Perioden zwar sehr lang, doch da es hauptsächlich auf die relativen regionalen Vergleiche und nicht so sehr auf eine Information über die Prozesse an sich ankommt, spielt die Gesamtverschiebung nur eine untergeordnete Rolle.

Auch diese Berechnungen wurden programmiert und am Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften durchgeführt. Die Ergebnisse sind auf den Abb. 24a, b und 25a, b dargestellt. Die zeitliche Verschiebung der Maxima der Kreuz-Korrelationsfunktionen auf Abb. 24a und 24b ist zur Verdeutlichung der regionalen Verteilung durch interpolierte Linien gleicher Verzögerung veranschaulicht. Die Maxima an den einzelnen Pegeln wurden dabei ebenfalls durch Interpolation gewonnen.

Die Karten zeigen für beide Perioden eine mit der Entfernung

von der Isar zunehmend verzögerte Reaktion der Grundwasserstände. Im Frühjahr deutlicher als im Sommer zeigt sich außerdem die Beeinflussung durch den Hangabfluß, da sich die Verzögerungszeiten zum Hang hin wieder verringern. Isar- und Hangeinfluß nehmen nach Norden zu allmählich ab, so daß hier die zwar geringeren, jedoch zeitlich unmittelbar wirkenden Schwankungen infolge der lokalen Versickerung hervortreten. Die sichtlich kürzeren Verzögerungszeiten, die sich im Einflußbereich der Isar für die Sommerperiode ergaben, lassen sich durch die stärkere Überhöhung der Flußwasser- gegenüber den Grundwasserständen und einer daraus resultierenden Beschleunigung der Fließvorgänge erklären. Nach Norden zu mag dagegen die mit der Abnahme der übrigen Einflüsse im Sommer verstärkt hervortretende Evapotranspiration dem unmittelbaren Niederschlagseinfluß entgegenwirken: Die Evapotranspiration schafft in den oberflächennahen Boden-zonen Retentionsräume, die bei einem Niederschlag erst aufgefüllt werden, bevor Sickerwasser an die tieferen Schichten bzw. an das Grundwasser abgegeben wird. Dieser Vorgang verzögert und verringert gleichermaßen auch den Hangabfluß im Sommer.

Die beiden Abb. 25a und b zeigen den Verlauf der Kreuz-Korrelationsfunktionen (Korrelogramme) der Pegel entlang der Achse vom Pegel Ic bis zum Pegel M (siehe Abb. 1), sowie die Autokorrelationsfunktion der Isar. Bei den Maxima der Funktionen ist jeweils der Betrag der Korrelationskoeffizienten angegeben. Deutlicher als an den Ganglinien selbst zeigt sich hier der große Unterschied im Verhalten der Grundwasserstände während der beiden betrachteten Perioden. Im Frühjahr herrschen lange Hochwasser mit hohen Amplituden vor, die ein gleichförmiges Verhalten der Wasserstände über das ganze Gebiet bewirken. Lokale Schneeschmelze und Niederschläge auf gesättigtem Boden bewirken eine schnelle Abgabe des Sickerwassers an das Grundwasser. Der Hangabfluß macht sich besonders deutlich bemerkbar, wie aus der Ganglinie des Pegels M und den zum Hang hin abnehmenden Verzögerungszeiten

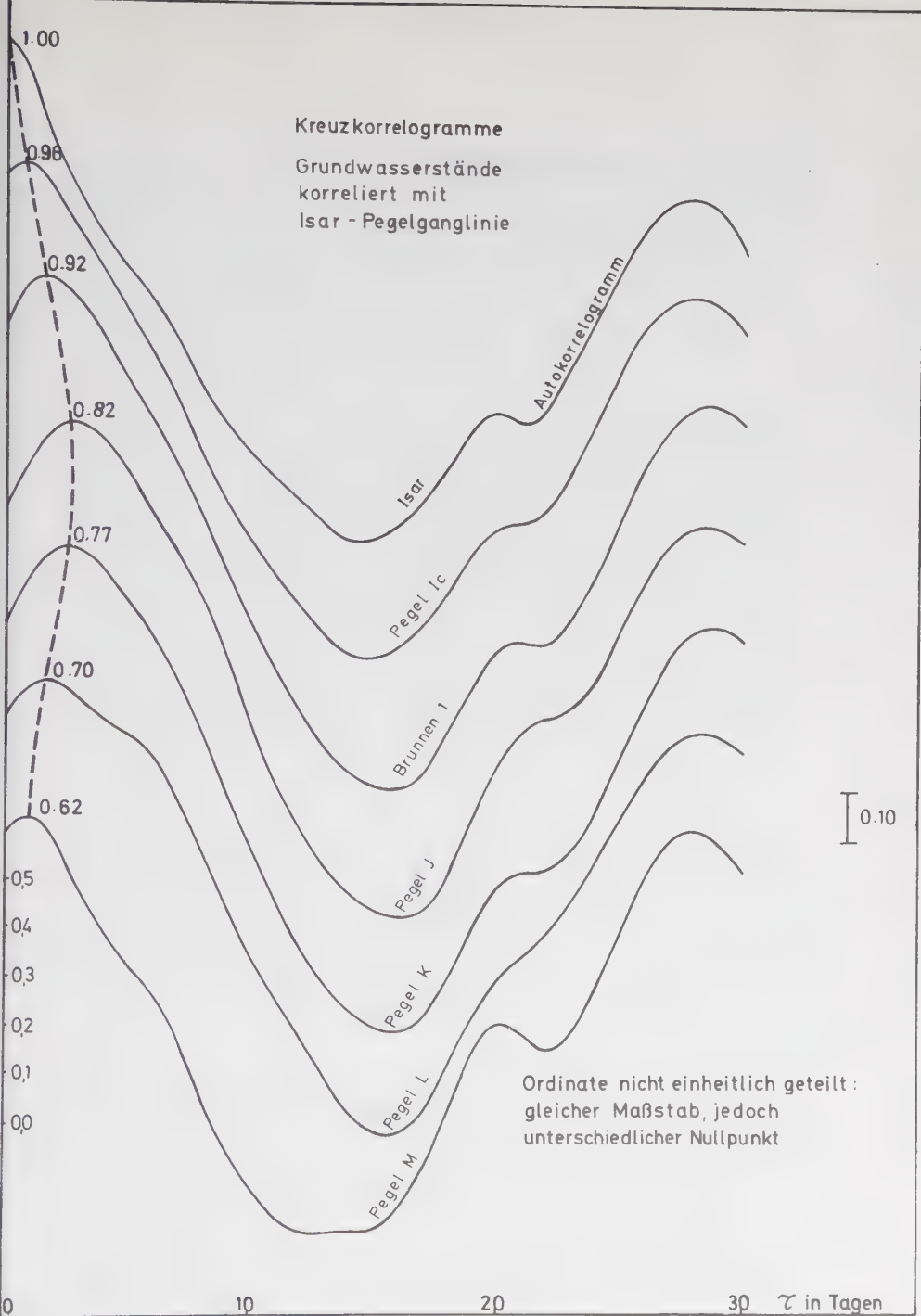
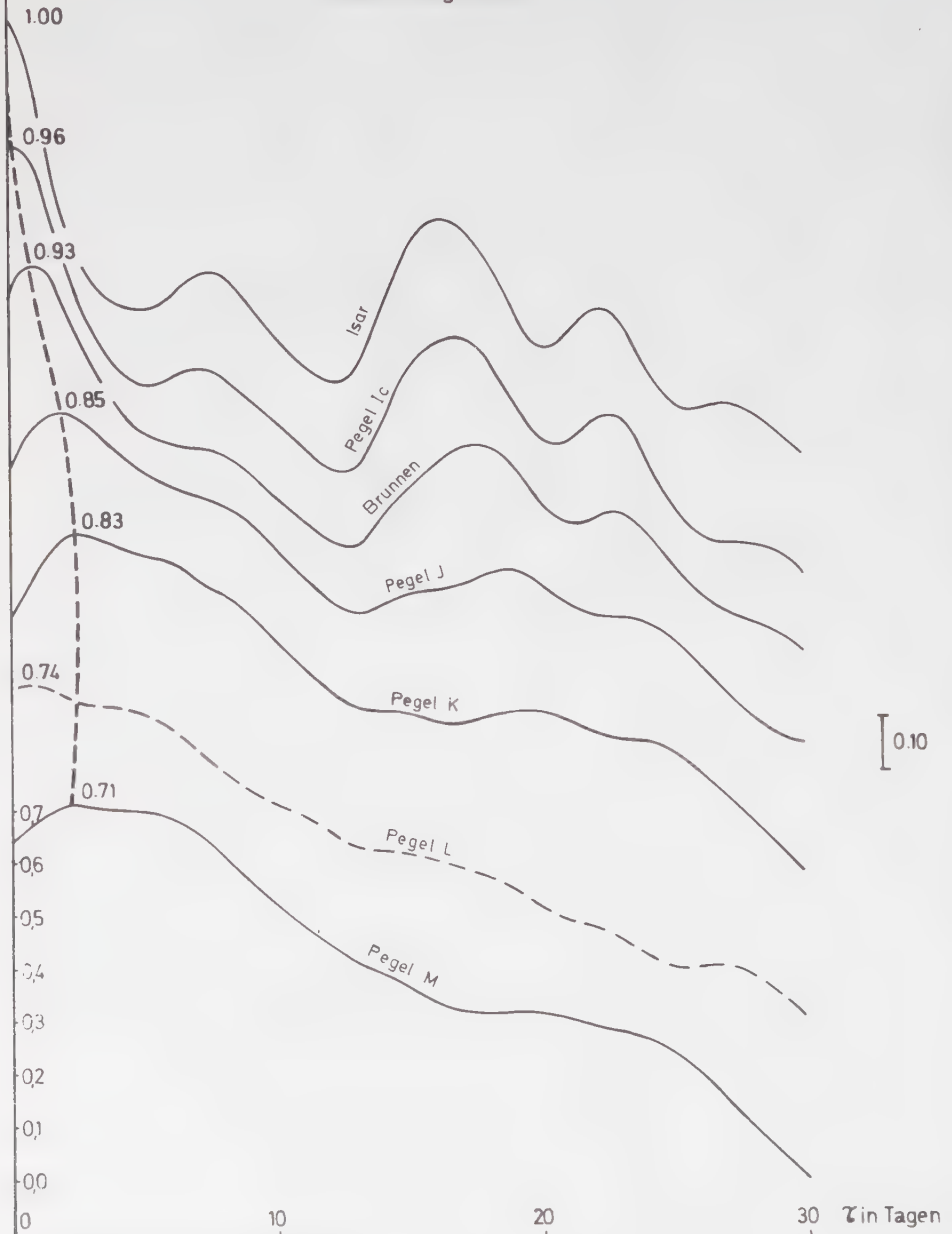


Abb. 25 a

1.2.70 - 30.4.70

Kreuzkorrelogramme

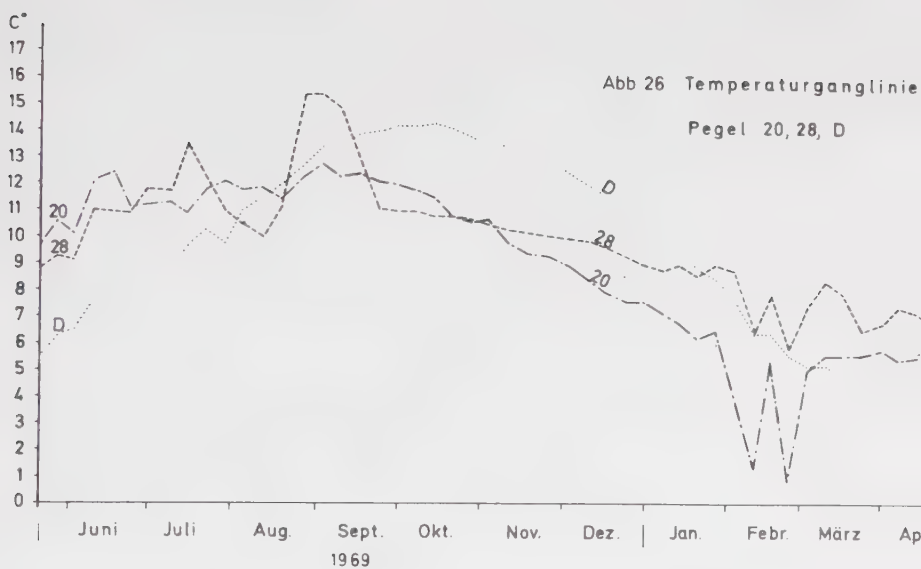


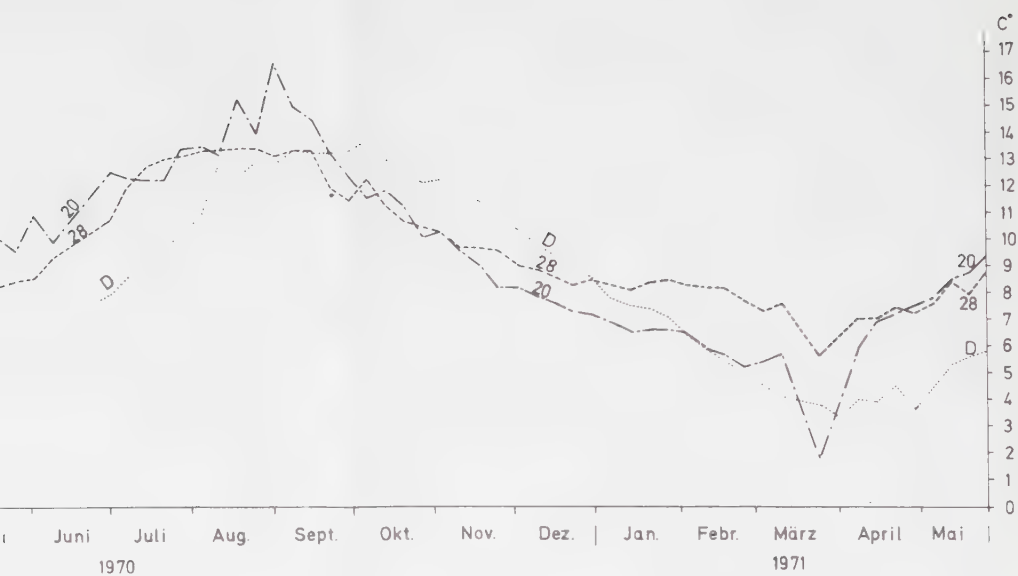
zu ersehen ist. Da jedoch die Grundwasserstandsganglinien vor dem Hangfuß einen ähnlichen Verlauf wie die Isarganglinien zeigen, weichen entlang der ganzen Strecke von der Isar bis zum Pegel M die Korrelationsfunktionen in ihrem allgemeinen Verlauf nicht wesentlich voneinander ab. Die Reichweite des Isareinflusses läßt sich daher in dieser Periode nur schwer erkennen.

Im Sommer dagegen zeigen sich - im Gegensatz zu den Wasserständen der Isar - die Grundwasserstandsschwankungen wesentlich weniger vom Niederschlag beeinflusst, was in erster Linie auf die Evapotranspiration zurückzuführen ist. Die Grundwasserspiegelschwankungen infolge des Isareinflusses lassen sich damit besser verfolgen. In diesem Fall können daher auch Angaben über die Reichweite des Isareinflusses gemacht werden: Die Abb. 25 b zeigt, daß die Ähnlichkeit der Kreuz-Korrelationsfunktionen mit der Autokorrelationsfunktion der Isar mit zunehmender Entfernung vom Fluß rasch abnimmt. Bereits bei der Ganglinie des Pegels J ist der Einfluß der Isarschwankungen nur noch sehr verwaschen erkennbar.

Ein auffällig abweichendes Verhalten zeigt der Pegel L in der Sommerperiode (vgl. Abb. 25 b). Die Erklärung dafür ist jedoch sehr einfach: Das Schreibgerät des Pegels war gestohlen worden, und etwa für ein Drittel des Untersuchungszeitraumes wurde die Ganglinie durch Interpolation aus den Nachbarpegeln abgeleitet. An diesem Beispiel zeigt sich deutlich die empfindliche Reaktionsfähigkeit der Korrelationsfunktionen.

Das hier behandelte Beispiel für die Anwendung der Kreuz-Korrelationsrechnung beweist, daß diese Methode ein brauchbares Hilfsmittel zur Beschreibung und Darstellung von Zusammenhängen in der Grundwasserhydrologie sein kann. Ein wesentlicher Vorteil einerseits gegenüber der Betrachtung von Einzelercheinungen, wie z.B. einer isolierten Hochwasserwelle oder von Extremwasserständen, besteht darin, daß mit diesem Verfahren das Verhalten über einen längeren Zeitraum erfaßt





werden kann. Andererseits ist die Kreuz-Korrelationsrechnung im Gegensatz zu vielen anderen statistischen Methoden schon auf relativ kurze Zeitreihen anwendbar, wie die vorstehende Untersuchung zeigt.

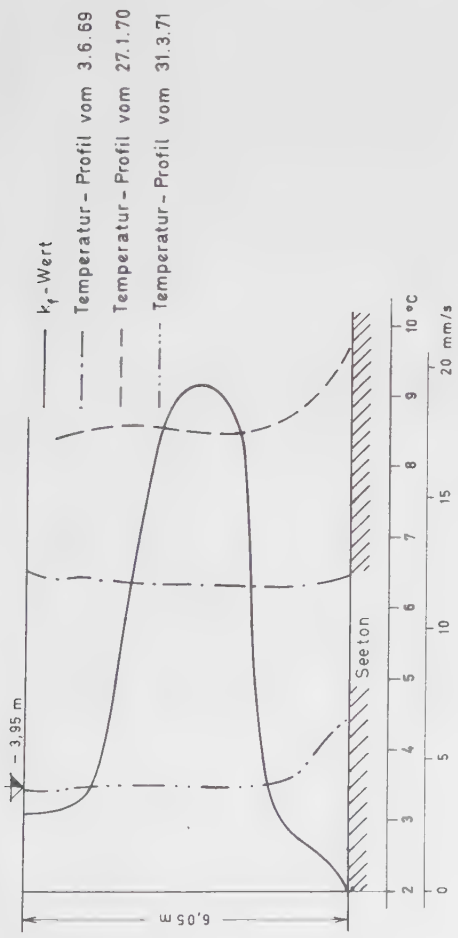
An dieser Stelle sei ein kurzer Vergleich zwischen den Untersuchungsergebnissen über die Schwankungen des Grundwasserspiegels und den Chemismus des Wassers eingefügt. Eine genauere Betrachtung zu diesem Punkt ist nicht möglich, da längere Meßreihen der chemischen Konzentrationen fehlen. Die beiden synoptischen Messungen allein lassen auf keinen sehr ausgeprägten Zusammenhang schließen: Wohl ist im Süden übereinstimmend die stärkste Zunahme landeinwärts sowohl der Konzentration wie der Verzögerungszeiten zwischen Grund- und Flußwasserständen festzustellen. Auch zeigt sich im ufernahen Bereich verglichen mit den Spiegelschwankungen im Zeitraum zwischen Mai und Juli insofern eine Ähnlichkeit, als die Linien gleicher Verzögerungszeit gerade auf der Strecke stärkster Infiltration eine Ausbuchtung landeinwärts - d h. geringere Verzögerung - erkennen lassen. Im hangnahen Bereich dagegen werden deutlich Differenzen erkennbar: Hier werden die Spiegelschwankungen in erster Linie vom Hangabfluß bestimmt, während der Chemismus dort vom Grundwasserzustrom aus den Deckenschottern des Neufahrner Höhenzuges abhängt.

Die Temperaturschwankungen sind zum Teil von den gleichen Einflüssen wie die Grundwasserstandsschwankungen abhängig. Das Verhalten der Temperaturganglinien nahe der Grundwasseroberfläche wird bestimmt durch den Flurabstand, der Ausmaß und Verzögerung der Beeinflussung von Lufttemperatur und Niederschlag regelt, durch Zustrom von versickerndem Oberflächenwasser und durch die Geometrie und die physikalischen Eigenschaften des Grundwasserkörpers als eines Zwei- bzw. Dreiphasensystems. Für die Temperaturverteilung im vertikalen Profil sind neben der spez. Wärme die Wärmeleit Zahlen innerhalb der am System beteiligten Stoffe sowie die Wärmeübergangszahlen zwischen ihnen bestimmend. Hinzu tritt in wechselndem Ausmaß die Wärmekonvektion. Temperaturgang-

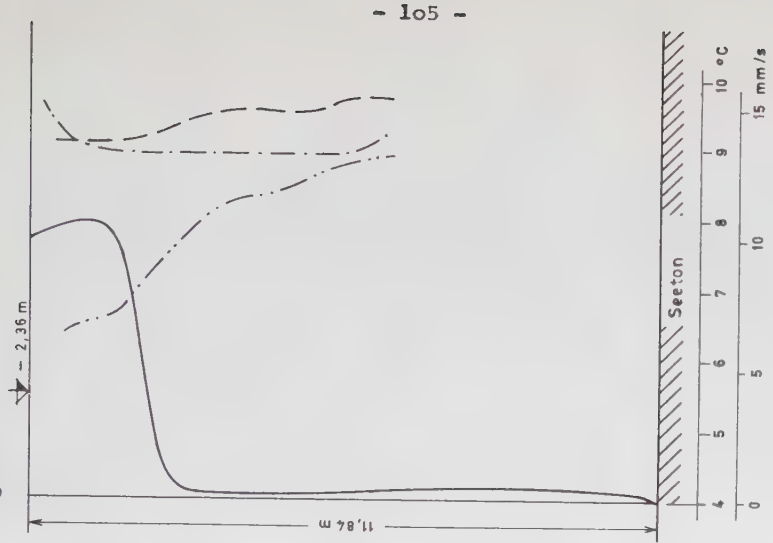
linien und Temperaturprofile geben daher im regionalen Vergleich einen Einblick in die Abhängigkeitsverhältnisse der Grundwassertemperatur vom Flurabstand und der Lage zu oberirdischen Gewässern. Unter acht in der Pupplinger Au gemessenen Ganglinien wurden als die drei charakteristischsten jene von den Pegeln D, 20 und 28 ausgewählt und auf Abb. 26 dargestellt. Der wenig differenzierte Temperaturgang von Pegel D gibt offensichtlich die Jahresganglinie der Lufttemperatur in stark geglätteter Weise wieder. Die Phasenverschiebung beträgt etwa zwei Monate: Die Maxima der Wassertemperatur liegen im Oktober, die Minima im April. Dagegen zeigt Pegel 20 mit seinem erheblich geringeren Flurabstand bereits einen deutlichen Niederschlagseinfluß. Die größten Temperaturschwankungen treten dann auf, wenn das Temperaturgefälle zwischen versickerndem Niederschlag bzw. Lufttemperatur und Grundwasser am größten ist, d.h. in den Schneeschmelzperioden und im Hochsommer. Bei Pegel 28 sind die Temperaturen deutlich mit den Isarwasserständen korreliert. Die größten Temperaturschwankungen treten zusammen mit Isarhochwässern auf, wobei der Zusammenhang umso deutlicher wird, je größer die Temperaturdifferenz zwischen Isarwasser und unbeeinflusstem Grundwasser ist. Abgesehen vom Sommer 1969 sind die Amplituden der Temperaturganglinie jedoch gedämpfter und der Verlauf ausgeglichener als bei Pegel 20. Eine Phasenverschiebung gegenüber der Lufttemperatur macht sich nicht bemerkbar.

Die gemessenen Temperaturganglinien bezogen sich auf die obersten 20 cm. Abb. 27 zeigt dagegen Temperaturprofile über die ganze Grundwassermächtigkeit. Die Messungen wurden in der Regel in vertikalen Abständen von 50 cm vorgenommen. Hierbei kehrte sich in der Reihenfolge Pegel D - 28 - 20 das Verhältnis der Juni- zu den Januartemperaturen um: Bei Pegel D sind erstere kleiner als letztere, bei Pegel 20 ist es umgekehrt. Dazwischen liegt der Pegel 28, bei dem die Differenz nur gering ist. Die Ursache dafür liegt in einem unterschiedlichen Beitrag der Phasenverschiebung von mittlerer Luft- zur Grundwassertemperatur. Die Phasenverschiebung vergrößert sich

Pegel D



Pegel 28



Pegel 20

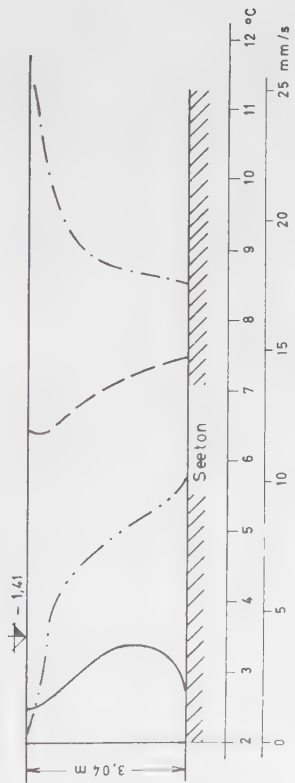


Abb 27

Temperatur - und k_f -Wert - Profile

mit dem Flurabstand, der Grundwassermächtigkeit und der Abnahme des Isareinflusses. Die vertikale Temperaturverteilung wird vorwiegend von der Grundwassermächtigkeit bestimmt. Mit zunehmender Tiefe unter dem Grundwasserspiegel nehmen die von äußeren Einflüssen herrührenden Temperaturschwankungen ab, und die Temperaturanglinie paßt sich im generellen Typ der in Abb. 26 für Pegel D dargestellten an, jedoch mit individuell veränderter Amplitude und Phasenverschiebung. Diese Erscheinung tritt verstärkt auf, wenn mit zunehmender Tiefe die Durchlässigkeitsbeiwerte abnehmen.

ZUSAMMENFASSUNG

G e o l o g i e u n d L a n d s c h a f t s b i l d der Pupplinger Au bei Wolfratshausen wurde durch glaziale Akkumulations- und Erosionsvorgänge geprägt. Nach dem endgültigen Rückzug der Gletscher aus dieser Gegend gegen Ende des 2. Rückzugsstadiums der Würmvereisung bildete sich der Wolfratshausener See, dessen Sedimente in großer Mächtigkeit vertreten sind.

Die heutige Talmorphologie wurde durch die **I s a r** und die **Loisach** gestaltet. Infolge **k ü n s t l i c h e r E i n - g r i f f e** in den Wasser- und Feststoffhaushalt der beiden Gewässer befindet sich das Untersuchungsgebiet im Übergang von einer ungestörten, überall den Gestaltungskräften der Gewässer ausgesetzten Wildflußlandschaft in ein Gebiet mit weitgehender Trennung zwischen einem durch Tiefenerosion isolierten Flußschlauch und den nur noch bei Extremhochwässern benetzten Auen. Der Feststofftransport zeigt sich stark beeinflusst von den wasserwirtschaftlichen Ausbaumaßnahmen oberhalb des betrachteten Gebietes.

Der Grenzkorndurchmesser zwischen Geschiebe und **S c h w e b - s t o f f** wurde zu 0,8 bis 1 mm bestimmt. Zur Erhöhung der Genauigkeit bei der Ermittlung der Schwebstoff-Frachten wurde

eine Formel für die Verteilung der Schwebstoffkonzentration über das vertikale Profil bei stationären Verhältnissen abgeleitet. Der Einfluß der künstlichen Eingriffe in das Flußregime auf den Feststoffhaushalt wurde anhand der Zeitreihen von Schwebstoffgehalt und Abfluß für die Zeit vor und nach dem Bau des Sylvensteinspeichers untersucht. Art und Ausmaß dieser Beeinflussung ließen sich durch vergleichende Betrachtungen der Varianzen verdeutlichen. In diesem Zusammenhang wurde auch die Beziehung zwischen Abfluß und Schwebstoffgehalt untersucht.

Die Komponenten der Grundwasserneubildung wurden über den Chemismus des Wassers und hierbei insbesondere durch die regionale Verteilung der Konzentrationen bestimmt. Zwischen dem Grundwasser der Pupplinger Au und der Isar besteht eine enge Wechselbeziehung; Ein großer Teil des Grundwassers erweist sich als Isarinfiltrat. Die Einspeisung von Flußwasser hat jedoch mit der Eintiefung der Flußsohle abgenommen und ist im Süden zum Erliegen gekommen. Im übrigen wird der Grundwasserstrom neben der örtlichen Versickerung von Niederschlagswasser durch den Übertritt von Grundwasser aus den Schottern des Neufahrner Höhenrückens sowie durch den Hangabfluß von dem östlich angrenzenden Moränenrücken gespeist. In geringerem Ausmaß unterquert Grundwasser aus dem jenseits des Flusses gelegenen Gebiet die Isar.

Die Grundwasserstandsschwankungen werden durch die örtlich durch Niederschlag erzeugten Amplituden geprägt, denen sich gegen die Ränder hin zunehmend die Einflüsse von Isar bzw. Hangabfluß überlagern. Einen Einblick in die Zusammenhänge zwischen den Grundwasserstands-Schwankungen und dem Oberflächenabfluß bzw. Niederschlag hinsichtlich Ausmaß und Phasenverschiebung vermitteln die Kreuz-Korrelogramme zwischen Isar- und Grundwasserständen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AIGNER, D.: Das Tölzer Diluvium. Geographisch-geologische Untersuchungen auf dem Gebiet der oberbayerischen Glazialablagerungen zwischen Loisach und Schlierach. Mitt. Geogr. Ges. München, 5 : 1 - 159, 1910
- [2] AMMON, L.v.: Die Gegend von München. Festschrift Geogr. Ges. München, S. 1 - 152, mit geol. Karte, München 1894
- [3] ANDERSON, R.L.: Distribution of the Serial Correlation Coefficients. Ann. Math. Stat., 8 : 1 - 13, Baltimore 1941
- [4] ANDERSON, A.G.: Distribution of Suspended Sediment in a Natural Stream. Transactions of the American Geophysical Union, 23 : 678 - 683, Washington 1942
- [5] BAUER, F.,
BURZ, J.: Der Einfluß der Feststoff-Führung alpiner Gewässer auf die Stauraumverlandung und Flußbetteintiefung. Die Wasserwirtschaft, 58 : 114 - 121, Stuttgart 1968
- [6] Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde:
Deutsches gewässerkundliches Jahrbuch, Donauebiet, Abflußjahr 1966, München 1970
- [7] Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde:
Gutachten Nr. 2908 - F, 1972
- [8] Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde:
Gutachten Nr. 2516 - F, 1966
- [9] BOGARDI, J.: Über die Zu- und Abnahme des Schwebstoffgehaltes in den Flüssen mit der Änderung des Abflusses. Die Wasserwirtschaft, 46 : 59 - 65, Stuttgart 1956
- [10] BOGARDI, J.: Bestimmung der Grenzzustände bei der Geschiebebewegung. Die Wasserwirtschaft, 58 : 205 - 212, Stuttgart 1968
- [11] BURZ, J.: Abgrenzung der Schwebstoff- und Sohlenfracht. Die Wasserwirtschaft, 48 : 387 - 389, Stuttgart 1958

- [12] COLBY, B.R., Computations of Total Sediment Discharge,
HEMBREE, C.H.: Niobrara River near Cody, Nebraska.
 Geological Survey, Water-Supply Paper
 1357, Washington 1955

- [13] COLBY, B.R.: Vertical Distribution of Velocity and
 Sediment Concentration in Fluvial Sediment
 of the Mississippi River of St. Louis,
 Missouri.
 Geological Survey, Water-Supply Paper
 1802, Washington 1965

- [14] DICKINSON, W.T.: Accuracy of Discharge Determinations.
 Hydrology Paper 20, Colorado State
 University, Fort Collins, Colorado 1967

- [15] DROST, W., Isotopenmethoden in der Grundwasserkunde.
 MOSER, H., Informationsheft des Büro Eurisotop, 61,
 NEUMAIER, F., Brüssel 1972
 RAUERT, W.:

- [16] Eidgen. Amt f. Wasserwirtschaft, Nr. 31:
 Wasserführung, Sinkstoff-Führung und
 Schlammablagerung des Alten-Rhein,
 Bern 1932

- [17] EINSTEIN, H.A.: The Bed-Load Function for Sediment Trans-
 portation in Open Channel Flows.
 U.S. Department of Agriculture, Techn.
 Bull. 1026, Washington 1950

- [18] ELGIZAWI, M.G.: Use of Cross-Correlation Techniques for
 Determining the Relationship between
 Ground-Water Levels and Source in the
 Nile-Delta Area.
 Proc. Intern. Symp. Math. Models in
 Hydrology, JASH, Warsaw 1971

- [19] FABRICIUS, F., A Buret Cylinder for Grainsize Analysis
 MÜLLER, St.: of Silt and Clay.
 Journal of Sedimentology, 14 : 39 - 50,
 Amsterdam 1970

- [20] FEICHTMAIER, A., Geologische Ausgabe des Blattes 651,
 LEBLING, D., Tölz, der Karte des Deutschen Reiches
 WEITHOFER, A.: 1:100 000 mit Querschnitt-Tafeln und
 Erläuterungen.
 München (Piloty und Loehle) 1923

- [21] FISZ, M.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathe-
 matische Statistik.
 Berlin (VEB Deutscher Verlag der Wissen-
 schaften) 1970

- [22] FLAXMAN, E.M., Some Factors affecting the Rules of
HOBBA, R.L.: Sedimentation in the Columbia River
Basin.
TAGU, 36 : 293 - 303, Washington 1955
- [23] FOLK, R.L.: Petrology of Sedimentary Rocks.
University of Texas, Austin, Texas 1965
- [24] GALLO, G., Trasporto di materiale alluvionale in
ROTUNDI, L.: seno a correnti idriche.
L'Energia Elettrica, 31, Milano, Nov.
1954
- [25] HALD, A.: Statistical Theory with Engineering
Applications.
London (Wiley & Sons) 1952
- [26] HARTUNG, F.: Ursachen und Verhütung der Staunraumver-
landung bei Talsperren.
Die Wasserwirtschaft, 49 : 3 - 12,
Stuttgart 1959
- [27] HAYAMI, S.: Hydrological Studies on the Jangtse
River.
Journal, Shanghai Science Institute,
New Series, 1, No. 1, 1941
- [28] JERZ, H.: Erläuterungen zur geologischen Karte
von Bayern 1:25000, Blatt Nr. 8134,
Königsdorf.
Bayer. Geol. Landesamt, München 1969
- [29] KALINSKE, A.A., Turbulence in Open Channel Flow.
ROBERTSON, J.M.: Engineering News-Record, 105 : 539 - 541,
New York 1941
- [30] KARMANN, Th.v.: Turbulence and Skin Friction.
Journal of the Aeronautical Science,
1 : 1 - 20, Easton 1934
- [31] KLEBELSBERG, R.v.: Handbuch der Gletscherkunde und Glazio-
logie.
Wien (Springer) 1948
- [32] KNAUER, J.: Geognostische Karte von Bayern 1:100 000,
Teilblatt München-Starnberg mit Er-
läuterungen.
München 1931
- [33] - Die Ablagerungen der älteren Würmeiszeit
(Vorrückungsphase) im süddeutschen und
norddeutschen Vereisungsgebiet.
Abh. Geol. Landesunters. am Bayer.
Oberbergamt, 21, 1 Kartentafel, München
1935

- [34] KÖRNER, H.: Schnee- und Eismechanik und einige ihrer Beziehungen zur Geologie. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, 2 : 45 - 67, Wien 1964
- [35] KRESSER, W.: Gedanken zur Geschiebe- und Schwebstoff-Führung der Gewässer. Österreichische Wasserwirtschaft, 16 : 6 - 11, Wien 1964
- [36] KREYSZIG, D.: Statistische Methoden und ihre Anwendung. Göttingen (Vandenhoeck & Ruprecht) 1968
- [37] MARSAL, D.: Statistische Methoden für Erdwissenschaftler. Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung) 1967
- [38] MEYER-PETER, E.: Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes. Mitt. Versuchsanst. Wasserbau u. Erdbau, ETH Zürich, 16, Zürich 1949
- [39] MÜLLER, G., FÖRSTNER, U.: Sedimenttransport im Mündungsgebiet des Alpenrheins. Geol. Rundschau, 57 : 229 - 259, Stuttgart 1968
- [40] NIKURADSE, J.: Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömungen in glatten Rohren. VDI-Forschungsheft Nr. 356, 1912
- [41] PRANDTL, L.: Führer durch die Strömungslehre. Braunschweig (Vieweg u. Sohn) 1942
- [42] RALSTON, A., WILF, H.S.: Mathematische Methoden für Digitalrechner. München (Oldenbourg) 1967
- [43] RODRIGUEZ-ITURBE, J., NORDINI, C.F.: Frequency Domain Analysis of Hydrologic Systems with Monthly Data. Proc. Intern. Symp. Math. Models in Hydrology, JASH, Warsaw 1971
- [44] ROTHPLETZ, A.: Die Osterseen und der Isarvorlandgletscher. Mitt. Geogr. Ges. München, 12 : 99 - 298, mit zwei Karten, München 1917
- [45] ROUSE, H.M.: Discussion on Modern Conceptions of the Mechanics of Fluid Turbulence. Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs., 102 : 523 - 543, Washington 1936

- [46] SCHAEFER, J.: Münchener Ebene und Isartal. Ein Beitrag zu ihrer Entstehung.
Mitt. Geogr. Ges. München, 53 : 175 - 203, München 1968
- [47] SCHMIDT-THOMÉ, P.: Zur Frage quartärer Krustenbewegungen im Alpen- und Voralpengebiet des Isartalbereiches.
Geol. Rundsch. 43 : 144 - 158, Stuttgart 1955
- [48] SCHOCKLITSCH, A.: Der Wasserbau.
2. Aufl., Wien (Springer) 1950
- [49] SEIBERT, P.: Die Pflanzengesellschaften im Naturschutzgebiet "Pupplinger Au".
Bayer. Landesst. f. Gewässerkunde, München 1958
- [50] SEIBERT, P.,
ZIELONKOWSKI, W.: Landschaftsplan "Pupplinger und Ascholdingener Au".
Schriftenr. Naturschutz u. Landschaftspflege, 2, München 1972
- [51] TAUBENHEIM, J.: Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten.
Leipzig (Geest & Portig) 1969
- [52] TRASK, P.D.: Origin and Environment of Source Sediments of Petroleum.
Houston Gulf Publ. Co. 1932
- [53] TROLL, K.: Die sogenannte Vorrückungsphase der Würm-Eiszeit und der Eiszerfall bei ihrem Rückgang.
Mitt. Geogr. Ges. München, 29 : 1 - 38, München 1936
- [54] VANONI, V.A.: Some Experiments on the Transportation of Suspended Load.
TAGU, 22 : 608 - 620, Washington 1941

Lebenslauf

Am 21. Juni 1939 wurde ich als Sohn des Offiziers Klaus Müller und seiner Frau Gudrun, geb. Ziemendorff, in Küstrin, Provinz Brandenburg, geboren. Nach dem Krieg und der Flucht nach Niedersachsen wurde ich 1946 in Celle eingeschult.

Volks- und Oberschule besuchte ich in Celle, Erlangen, Berlin und München und legte im Jahre 1959 am Alten Realgymnasium in München die Reifeprüfung ab. Nach der anschließenden Militärdienstzeit studierte ich an der Technischen Hochschule in München bis zur Diplomprüfung im Jahre 1966 Bauwesen. In den darauffolgenden Jahren studierte ich zunächst an der Technischen Universität, später an der Ludwigs-Maximilians-Universität Geologie. Während dieser Zeit war ich bereits an der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde und seit 1972 am Bayerischen Landesamt für Umweltschutz beruflich tätig.

